

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2026. Т. 71, № 2

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2026. Т. 71, № 2

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР.
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі.
Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

С. С. Щербаков – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
(заместитель главного редактора)

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

Д. Басаран – Университет Буффало, Буффало, Соединенные Штаты Америки

П. А. Витязь – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии –
Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь

Дзефэн Ван – Юго-Западный университет Цзяотун, Чэнду, Китайская Народная Республика

В. Г. Залесский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

- В. В. Зильбершмидт** – Международный центр виброударных систем, Школа механического, электрического и технологического машиностроения им. Вольфсона Университета Лафборо, Лафборо, Великобритания
- А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- М. Консари** – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. П. Ласковнѐв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- Н. А. Махутов** – Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- В. В. Митюшев** – Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- Нгуен-Ву Тронг** – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин** – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. Пенязьков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Шуньин Цзи** – Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2026. Т. 71, №2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *Ю. А. Агейчик*

Подписано в печать 15.06.2026. Выход в свет 26.06.2026. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 54 экз. Заказ 122.
Цена номера: индивидуальная подписка – 15,86 руб., ведомственная подписка – 35,17 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП №02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2026

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2026, vol. 71, no. 2

The Journal was founded in 1956 under the titles
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database
of Russian Science Citation Index (RSCI)

E d i t o r - i n - C h i e f

Sergei A. Chizhik – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

E d i t o r i a l B o a r d

Sergei S. Sherbakov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
(Deputy Editor-in-Chief)

Irina A. Starostsina (lead editor)

Cemal Basaran – University of Buffalo, Buffalo, United States of America

Pyotr A. Vityaz – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy – Academician O. V. Roman
Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

Zefeng Wang – Southwest Jiaotong University, Chengdu, People's Republic of China

Vitali G. Zalesski – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Vadim V. Silberschmidt – International Centre of Vibro-Impact Systems, Wolfson School of Mechanical
and Manufacturing Engineering at Loughborough University, Loughborough, United Kingdom

Aliaksandr Ph. Ilyshchanka – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy –
Academician O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Republic of Belarus

Michael Khonsari – Louisiana State University, Baton Rouge, United States of America

Sergei M. Kostromitsky – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Alexander G. Kravtsov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus

Leonid G. Krasnevski – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus

Alexander M. Malyarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
Nikolay A. Makhutov – Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vladimir V. Mityushev – Cracow University of Technology, Krakow, Republic of Poland
Nikolai K. Myshkin – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
Nguyen-Vu Truong – National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam
Sergey V. Panin – Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Valery M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Mikhail L. Kheifetz – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Shunying Ji – Joint Institute of Dalian University of Technology and Belarusian State University, Dalian, People's Republic of China

Address of the Editorial Office:
 1, Akademicheskaya St., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
 Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
 vestift.belnauka.by

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.
 Physical-technical series, 2026, vol. 71, no. 2
Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
 Computer imposition *Yu. A. Aheichyk*

It is sent of the press 15.06.2026. Appearance 26.06.2026. Format $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Offset paper. The press digital.
 Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 54 copies. Order 122.
 Number price: individual subscription – 15,86 byn., departmental subscription – 35,17 byn.

Publisher and printing execution:
 Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya navuka"
 Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina St., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

© Formalization. RUE "Publishing House "Belaruskaya navuka",
 Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2026

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Хохлов Д. Д., Быков А. А., Поляков М. П., Шишкин Д. В., Белых А. Ю., Корнеева А. А., Золотухина А. А.** Контроль температуры ванны расплава при электронно-лучевом аддитивном формообразовании методом спектральной термографии 95
- Грабчиков С. С., Грабчикова Е. А., Драпезо А. П., Зубарь Т. И., Канафьев О. Д., Лосев А. В., Михайлов А. В., Русецкий Г. А.** Разработка материалов электромагнитной защиты и исследование уровней электромагнитных помех, наведенных электродвигателем..... 105

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Верещагин М. Н., Черниченко Ю. Д., Шишков С. В.** Влияние толщины бандажа на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава 118

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Камлюк А. Н., Говор Э. Г., Лихоманов А. О.** Зависимость дисперсности низкократных пен от положения в слое пены по высоте..... 127
- Ольшанский А. И., Котов А. А., Кузьменков С. М.** Конвективная сушка тонких влажных теплоизоляционных материалов..... 141

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Войтик О. Л., Делендик К. И., Коляго Н. В., Ковальчук Е. В., Рощин Л. Ю.** Совершенствование процесса прецизионного изготовления микроструктур типа «квадрат» с использованием фотолитографии и электрохимии..... 149
- Зеневич А. О., Кочергина О. В., Мухуров Н. И., Куданович О. Н., Денисюк С. В.** Использование кремниевых фотоумножителей в визуализаторах ближнего инфракрасного излучения 158

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Юшкевич В. Ю., Петкевич М. Н., Тарутин И. Г.** Итеративное обучение модели дозиметрического планирования стереотаксической лучевой терапии при патологиях грудного и поясничного отделов позвоночника 166

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

- Khokhlov D. D., Bykov A. A., Poliakov M. P., Shishkin D. V., Belykh A. Yu., Korneeva A. A., Zolotukhina A. A.** Temperature monitoring of the molten bath in electron beam additive manufacturing using spectral thermography..... 95
- Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Mikhailov A. V., Rusetskiy G. A.** The development of materials for electromagnetic protection and the investigation of electromagnetic interference levels generated by the electric motor 105

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

- Vereshchagin M. N., Chernichenko Yu. D., Shishkov S. V.** Effect of the bands thickness on the profile of the roller in the two-roller method of fast hardening of the melt..... 118

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Kamluk A. N., Govor E. G., Likhomanov A. O.** Dependence of dispersion of low-expansion foam on the position in the foam layer by height..... 127
- Ol'shanskii A. I., Kotov A. A., Kuzmenkov S. M.** Convective drying of thin wet heat-insulation materials 141

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

- Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Kavalchuk E. V., Roshchyn L. Yu.** Improvement of the process of precision fabrication of "square"-type microstructures using photolithography and electrochemistry..... 149
- Zenevich A. O., Kochergina O. V., Mukhurov N. I., Kudanovich O. N., Denisyuk S. V.** Use of silicon photo-multipliers in near-infractory visualizers 158

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Yushkevich V. Yu., Pietkevich M. N., Tarutin I. G.** Iterative training of an automated dosimetric planning model for stereotactic radiotherapy in thoracic and lumbar spine pathologies 166

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>
УДК 535.8, 620.179.18



Оригинальная статья

**Д. Д. Хохлов*, А. А. Быков, М. П. Поляков, Д. В. Шишкин, А. Ю. Белых,
А. А. Корнеева, А. А. Золотухина**

*Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
ул. Бутлерова, 15, 117342, Москва, Российская Федерация*

**КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВАННЫ РАСПЛАВА
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ АДДИТИВНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ
МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕРМОГРАФИИ**

Аннотация. Представлен метод спектральной термографии для контроля пространственного распределения температуры в ванне расплава при аддитивном формообразовании металлических изделий и экспериментальная установка для реализации данного метода. В основе метода лежит мультиспектральная съемка в четырех узкоспектральных каналах при помощи одиночного матричного приемника излучения. В ходе работы проведена экспериментальная апробация метода на установке электронно-лучевого аддитивного формообразования. Полученные в эксперименте данные подвержены характерным искажениям, связанным с частичным осаждением материала на защитном стекле мультиспектральной камеры. Предложенный алгоритм предварительной обработки скомпенсировал указанные искажения. Результаты экспериментов по электронно-лучевому аддитивному формообразованию указывают на возможность регистрации относительных изменений температуры в процессе аддитивного формообразования. При выбранной частоте регистрации кадров на пространственных распределениях температуры видны периодические изменения, сопряженные с особенностями выбранных режимов наплавки. Общий характер пространственного распределения температуры в ванне расплава в значительной мере совпадает с теоретическими данными, описанными в ранее опубликованных работах. Полученные результаты позволяют судить о возможности дальнейшего применения предложенного подхода для контроля температурных режимов при аддитивном формообразовании.

Ключевые слова: спектральная термография, мультиспектральная камера, неразрушающий контроль, электронно-лучевое аддитивное формообразование, бесконтактный контроль температуры

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-79-10239; <https://rscf.ru/project/24-79-10239>).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Хохлов Демид Денисович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, e-mail: khokhlov.dd@ntcup.ru; *Быков Алексей Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, e-mail: bykov@ntcup.ru; *Поляков Михаил Петрович* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, e-mail: polyakov.mp@ntcup.ru; *Шишкин Дмитрий Владимирович* – техник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0008-4723-0803>, e-mail: shishkindmv@mpei.ru; *Белых Андрей Юрьевич* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0002-6507-3000>, e-mail: belykh.ay@ntcup.ru; *Корнеева Анастасия Алексеевна* – ведущий инженер-конструктор Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0009-0009-9211-7081>, e-mail: korneeva.aa@ntcup.ru; *Золотухина Анастасия Александровна* – младший научный сотрудник Научно-технологического центра уникального приборостроения Российской академии наук, <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>, e-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Вклад авторов: *Хохлов Демид Денисович* – формулирование идеи исследования, анализ и обобщение данных литературы, планирование эксперимента, написание текста рукописи, работа с графическим материалом, анализ результатов, формулирование выводов; *Быков Алексей Александрович* – разработка конструкции мультиспектральной камеры, анализ и систематизация экспериментальных данных, редактирование текста рукописи; *Поляков Михаил Петрович* – разработка оптической схемы мультиспектральной камеры, сбор и систематизация данных, редактирование текста рукописи; *Шишкин Дмитрий Владимирович* – планирование эксперимента по наплавке, сбор и систематизация данных; *Белых Андрей Юрьевич* – разработка и отладка алгоритмов работы мультиспектральной камеры, обработка данных; *Корнеева Анастасия Алексеевна* – разработка конструкции вспомогательной оснастки для съемки, работа с текстом; *Золотухина Анастасия Александровна* – разработка алгоритма калибровки и вычисления температуры.

Для цитирования: Контроль температуры ванны расплава при электронно-лучевом аддитивном формообразовании методом спектральной термографии / Д. Д. Хохлов, А. А. Быков, М. П. Поляков [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 95–104. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>

Поступила в редакцию: 17.02.2026

Доработанный вариант: 20.05.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Demid D. Khokhlov*, Alexey A. Bykov, Mikhail P. Poliakov, Dmitriy V. Shishkin, Andrey Yu. Belykh, Anastasiia A. Korneeva, Anastasia A. Zolotukhina

*Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences,
15, Butlerov St., 117342, Moscow, Russian Federation*

TEMPERATURE MONITORING OF THE MOLTEN BATH IN ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING USING SPECTRAL THERMOGRAPHY

Abstract. This article presents a spectral thermography method for monitoring the spatial temperature distribution in the molten bath during additive manufacturing of metal parts, along with the experimental setup designed to implement this method. The approach is based on multispectral imaging across four narrow-band spectral channels using a single image sensor. The method was experimentally tested on an electron beam additive manufacturing system. The raw experimental data exhibited characteristic distortions caused by partial material deposition on the protective camera window. A dedicated preprocessing algorithm was developed to compensate for these distortions. Experimental results from electron beam additive manufacturing system demonstrate the feasibility of detecting relative temperature changes during the additive synthesis process. At the selected frame capture rate, periodic temperature fluctuations are observable in the spatial temperature maps, correlating with the specific cladding mode parameters. The overall pattern of the spatial temperature distribution in the molten bath shows a high degree of consistency with theoretical predictions reported in earlier publications. These findings confirm the potential for further application of the proposed approach in temperature regime monitoring during additive manufacturing processes.

Keywords: spectral thermography, multispectral camera, non-destructive testing, electron-beam additive manufacturing, non-contact temperature monitoring

Acknowledgements: the study was funded by the Russian Science Foundation (grant no. 24-79-10239 (<https://rscf.ru/en/project/24-79-10239>)).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: *Demid D. Khokhlov* – Cand. Sci (Engineering), Laboratory Chief at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-0919-7762>, e-mail: khokhlov.dd@ntcup.ru; *Alexey A. Bykov* – Cand. Sci. (Engineering), Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-7574-3437>, e-mail: bykov@ntcup.ru; *Mikhail P. Poliakov* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0004-3484-6466>, e-mail: polyakov.mp@ntcup.ru; *Dmitriy V. Shishkin* – Technician at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0008-4723-0803>, e-mail: shishkindmv@mpei.ru; *Andrey Yu. Belykh* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0002-6507-3000>, e-mail: belykh.ay@ntcup.ru; *Anastasiia A. Korneeva* – Lead Design Engineer at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0009-0009-9211-7081>, e-mail: korneeva.aa@ntcup.ru; *Anastasia A. Zolotukhina* – Junior Researcher at Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>, e-mail: zolotukhina.aa@ntcup.ru

Contribution of the authors: *Demid D. Khokhlov* – conceptualization of the research idea, literature analysis and synthesis, experimental design for cladding, manuscript drafting, graphical material preparation, formulation of conclusions; *Alexey A. Bykov* – design of the multispectral camera, analysis and systematization of experimental data, manuscript editing; *Mikhail P. Poliakov* – optical scheme design for the multispectral camera, data collection and systematization, manuscript editing; *Dmitriy V. Shishkin* – planning of the cladding experiment, data collection and systematization; *Andrey Yu. Belykh* –

development and debugging of multispectral camera operation algorithms, data processing; *Anastasiia A. Korneeva* – development of the design of auxiliary equipment for data acquisition, manuscript editing; *Anastasia A. Zolotukhina* – development of the temperature calibration and calculation algorithm.

For citation: Khokhlov D. D., Bykov A. A., Poliakov M. P., Shishkin D. V., Belykh A. Yu., Korneeva A. A., Zolotukhina A. A. Temperature monitoring of the molten bath in electron beam additive manufacturing using spectral thermography. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 95–104 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-95-104>

Received: 17.02.2026

Modified: 20.05.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Наиболее современными и активно развивающимися обрабатывающими технологиями являются аддитивные технологические процессы¹. Внедрение новых технологий в данной сфере позволяет работать с различными материалами и обеспечивает изготовление деталей высокого уровня сложности [1; 2]. Рост технических возможностей также обусловлен развитием методов и средств неразрушающего контроля. Контроль важных технологических параметров в режиме реального времени обеспечивает как повышение характеристик изготавливаемых деталей, так и снижение расхода материала в случае существенного отклонения параметров [3].

Значимым фактором при аддитивном производстве изделий из металла является температура в ванне расплава [4]. Значение температуры материала определяет размер ванны расплава и скорость ее охлаждения [5]. В свою очередь данные параметры аддитивного процесса влияют на качество детали, а именно – на появление макродефектов [3] и микродефектов [4; 5], отклонение формы и размеров изделия [6; 7], недостаточное частичное сплавление [5]. Регулировать температуру можно путем изменения подводимой мощности. С данной задачей призваны справляться автоматические системы управления технологических установок [8; 9]. Однако для их корректной работы необходимы сведения о температуре в ванне расплава в режиме реального времени.

В качестве источника обратной связи могут выступить оптические пирометры. Инфракрасные (ИК) и спектральные пирометры [10–12] обеспечивают измерение температуры, усредненной по пятну визирования, но для пространственного картирования температуры следует перейти к изображающим методам. Яркостная ИК-термография [13; 14] является наиболее распространенным методом, хотя точность его ограничена ввиду ряда особенностей. Во-первых, пространственное разрешение при работе в средней и дальней ИК-областях ниже по сравнению с иными системами, рассчитанными на видимый диапазон. Во-вторых, невозможность учесть распределение излучательной способности по поверхности объекта снижает точность измерения температуры. Уменьшить влияние указанных ограничений позволяют методы спектральной термографии видимого и ближнего ИК-диапазонов [15–17], в которых использование более коротковолнового излучения повышает пространственную разрешающую способность, а излучательная способность независимо определяется для каждой точки изображения.

Авторы настоящей работы предложили свой метод спектральной термографии и устройство для его реализации [18]. Метод основан на мультиспектральной съемке объекта в четырех узко-спектральных каналах и дальнейшем определении температуры по четырем значениям интенсивности в каждой точке. Апробация метода на тестовых объектах показала его работоспособность, и потому было принято решение испытать его на реальной установке аддитивного формообразования.

Цель работы – апробация метода контроля температуры в ванне расплава в ходе тестовых экспериментов на установке электронно-лучевого аддитивного формообразования.

Метод спектральной термографии. В основе метода, как уже отмечалось, лежит мультиспектральная съемка в четырех спектральных каналах, а именно: 620 ± 15 , 660 ± 20 , 780 ± 21 и 840 ± 23 нм. Каждый из этих каналов задается независимой оптической системой, представляющей собой спектральный интерференционный светофильтр и объектив (рис. 1, а). При этом полученные спектральные изображения регистрируются единственным матричным приемником

¹ ГОСТ Р 57558–2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.

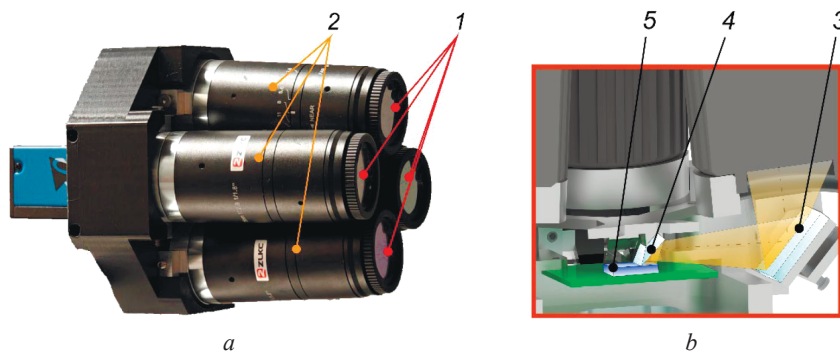


Рис. 1. Общий вид мультиспектральной камеры (а) и фрагмент трехмерной модели (b): 1 – спектральные фильтры; 2 – объективы; 3 – подвижное зеркало; 4 – неподвижное зеркало; 5 – матричный приемник излучения

Fig. 1. General view of multispectral camera (a) and a fragment of 3D model (b): 1 – spectral filters; 2 – objectives; 3 – adjustable mirror; 4 – fixed mirror; 5 – matrix radiation receiver

излучения (МПИ). Для каждого из спектральных каналов на чувствительной площадке МПИ выделена конкретная зона. Для единовременной регистрации изображений всех четырех спектральных каналов в оптической системе каждого из них установлена пара зеркал, что наглядно показано на увеличенном фрагменте трехмерной модели на рис. 1, b. Подробное описание оптической системы, использованных комплектующих и особенностей юстировки спектральных каналов приводится в [18].

Отснятые таким образом изображения были использованы в качестве необработанных исходных данных. Перед определением температуры следовало скорректировать искажения, вносимые мультиспектральной камерой. Поскольку в ее конструкцию входит монохромный МПИ на основе КМОП-приемника, чувствительность его пикселей для разных спектральных каналов различна. Вдобавок к этому при изменении экспозиции отклик в каждом канале также меняется по-разному. Для корректировки указанных искажений нами предварительно отснят набор тест-объектов с известными свойствами. В качестве широкополосного объекта была использована калибровочная фотометрическая сфера (Spectra-FT-2300-W, Labsphere, США) и получена первая серия изображений, зарегистрированных в диапазоне времен экспонирования от 0,0001 до 0,25 с. Затем, чтобы оценить разность чувствительности каналов, отснят узкополосный калибровочный объект, собранный на основе плазменного источника света (XWS 65, ISTEQ, Нидерланды), сопряженного с дифракционным монохроматором (M266i-IV, Solar Laser Systems, Беларусь). В результате калибровки зарегистрирована вторая серия изображений в диапазоне 550–900 нм с шагом в 5 нм. На основе указанных двух серий изображений произведена коррекция нелинейности и спектральной неоднородности чувствительности МПИ.

Для дальнейшей обработки серий изображений также произведена коррекция виньетирования и окончательное сведение изображений в каналах (геометрические преобразования). Коррекция виньетирования выполнялась по наиболее контрастному изображению фотометрической сферы. Геометрические преобразования осуществлялись классическим методом с применением стандартного в машинном зрении тест-объекта в виде шахматных клеток со стороной квадрата 1 мм. Полный цикл преобразований в алгоритме предварительной коррекции представлен на рис. 2.

После предварительной коррекции обработанные изображения возможно использовать для определения температуры. Важный момент заключается в том, что температуру не измеряли косвенным образом, а определяли ближайшую к четырем значениям интенсивности кривую Планка в каждой точке путем оптимизации:

$$\sum_{i=1}^4 (I(\lambda_i) - \varepsilon(\lambda_i) \cdot I_{\text{ПЧТ}}(\lambda_i, T))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $I(\lambda_i)$ – значения четырех интенсивностей с каждого канала мультиспектральной камеры; $I_{\text{ПЧТ}}(\lambda_i, T)$ – теоретическая кривая Планка; $\varepsilon(\lambda_i)$ – излучательная способность; i – номер спектрального канала.

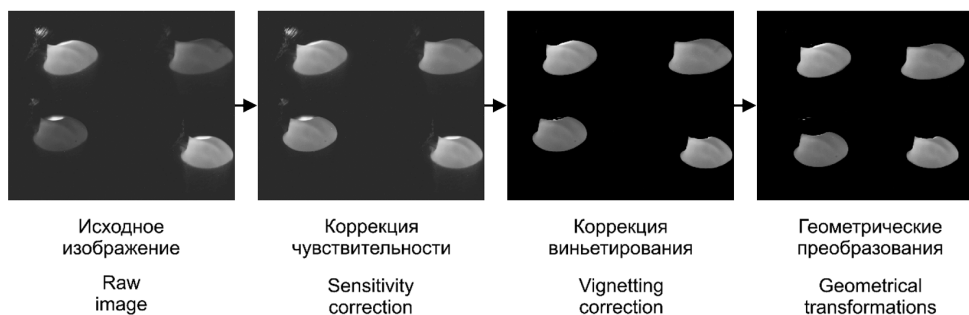


Рис. 2. Алгоритм предварительной коррекции изображений

Fig. 2. Image pre-correction algorithm

Изначальная точка для оптимизации вычислялась на основании данных двухволновой пирометрии для каналов 780 и 840 нм, при этом излучательная способность была одинаковой. При помощи алгоритма [19] в среде MATLAB R2024a для каждого пиксела изображения производился поиск температуры. Зависимость излучательной способности от длины волны в рассматриваемом диапазоне учитывалась через значения $\varepsilon(\lambda_i)$ для отдельных спектральных каналов [20; 21]. Вместе с тем из-за ограниченного числа каналов для решения задачи совместного восстановления температуры и излучательной способности данных недостаточно, поэтому в алгоритме следует использовать регуляризующее ограничение на изменение $\varepsilon(\lambda_i)$ между соседними кадрами. Соответственно, при оптимизации значения излучательной способности по длинам волн были жестко ограничены условием $\pm 0,1 \cdot \varepsilon(\lambda_i)$ от предыдущих кадров в серии.

В процессе предварительного тестирования метода были зарегистрированы серии изображений модели абсолютно черного тела (АЧТ) (образцовый излучатель АЧТ «Гелиос», ООО «Научно-производственная лаборатория “МЕТРОПИР”, Россия) и температурной лампы накаливания ТРУ-1100-2350. В диапазоне температур АЧТ 1173–1673 К (900–1400 °С) с шагом в 50 К среднее значение абсолютной погрешности составило 8 К, а максимальное – 31 К. Для лампы накаливания в диапазоне токов 9–16 А при сравнении с результатами работы [22] среднее значение абсолютной погрешности составило 43 К, а максимальное значение – 89 К. Большее значение погрешности в случае температурной лампы может быть связано как с особенностями самой лампы, так и с отсутствием в рамках настоящей работы независимого контроля состояния вольфрамовой ленты и распределения температуры по ней поверочными средствами. Поэтому данный результат рассматривался как дополнительная качественная проверка алгоритма, тогда как основная оценка погрешности метода выполнялась по модели АЧТ.

Результаты и их обсуждение. Перед началом эксперимента конструкция мультиспектральной камеры была доработана путем установки защитного стекла и плотного кожуха, что было обусловлено защитой оптических элементов от осаждения на них испаряемых компонентов сплава и примесей, которые вносят дополнительную погрешность и являются неотъемлемой частью электронно-лучевого аддитивного формообразования (ЭЛАФ) [23]. В рассматриваемом процессе аддитивного формообразования большая часть связанных с осаждением загрязнений сконцентрирована на защитном стекле, что означает изменение его коэффициента пропускания. Таким образом, измерив данный коэффициент при помощи спектрофотометра (СФ-2000, ОКБ «Спектр», Россия) до и после наплавки, можно восстановить линейную зависимость степени загрязнения и приближенно установить коэффициент пропускания в зависимости от времени. Это, в свою очередь, позволяет снизить влияние изменения коэффициента пропускания на значение определяемой температуры. Коэффициент был измерен в 9 точках по поверхности защитного стекла. После электронно-лучевого формообразования интегральный коэффициент пропускания составил около 0,74 от интегрального коэффициента до эксперимента для всех интересующих точек.

Для проведения исследования мультиспектральная камера располагалась в вакуумной камере установки ЭЛАФ (рис. 3). Поле зрения мультиспектральной камеры было совмещено с кончиком мундштука, через который подавалась проволока в ванну расплава.

Непосредственно в ходе эксперимента по ЭЛАФ было наплавлено несколько одиночных валиков длиной 80 мм. Скорость наплавки составляла 125 мм/мин. В качестве наплавляемого

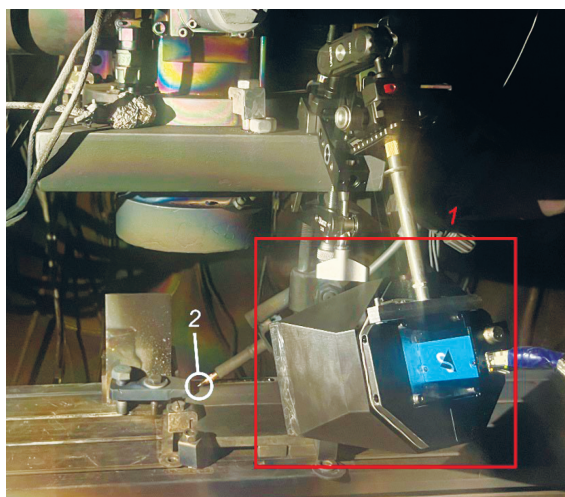


Рис. 3. Мультиспектральная камера в установке электронно-лучевого аддитивного формообразования: 1 – мультиспектральная камера; 2 – зона формирования ванны расплава

Fig. 3. Multispectral camera in an electron beam additive manufacturing setup: 1 – multispectral camera; 2 – the molten pool area

расплава. Данное оптимальное положение недоступно в силу того, что в нем находится электронно-лучевая пушка. Ось наблюдения мультиспектральной камеры ориентирована под углом 40° к плоскости подложки и к оси валика. При этом сам валик по форме напоминает полуцилиндр, а индикатриса излучения металлического расплава значительно отличается от закона Ламберта. В той

материала использовался титановый сплав ВТ6¹ в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Подложка изготовлена из прямоугольного бруска ВТ6 толщиной 20 мм. Для всех валиков мощность электронного пучка составила 780 Вт и ускоряющее напряжение – 60 кВ. Исследовалась наплавка валиков без развертки электронного луча, а также с развертками форм «окружность + дуга» и «зиг-заг».

По зарегистрированным сериям изображений были получены пространственные карты температур. Примеры карт показаны на рис. 4. Точки отмечены на рисунках цветными маркерами.

При сравнении полученных распределений с моделью [24] видны некоторые различия. В рассмотренных случаях температура в действительности падает в направлении от электронного луча в сторону хвоста ванны расплава. Однако во всех предложенных картах наблюдается асимметрия, которая связана с ориентацией мультиспектральной камеры. Оптимальное положение мультиспектральной камеры подразумевает ортогональное размещение относительно поверхности валика

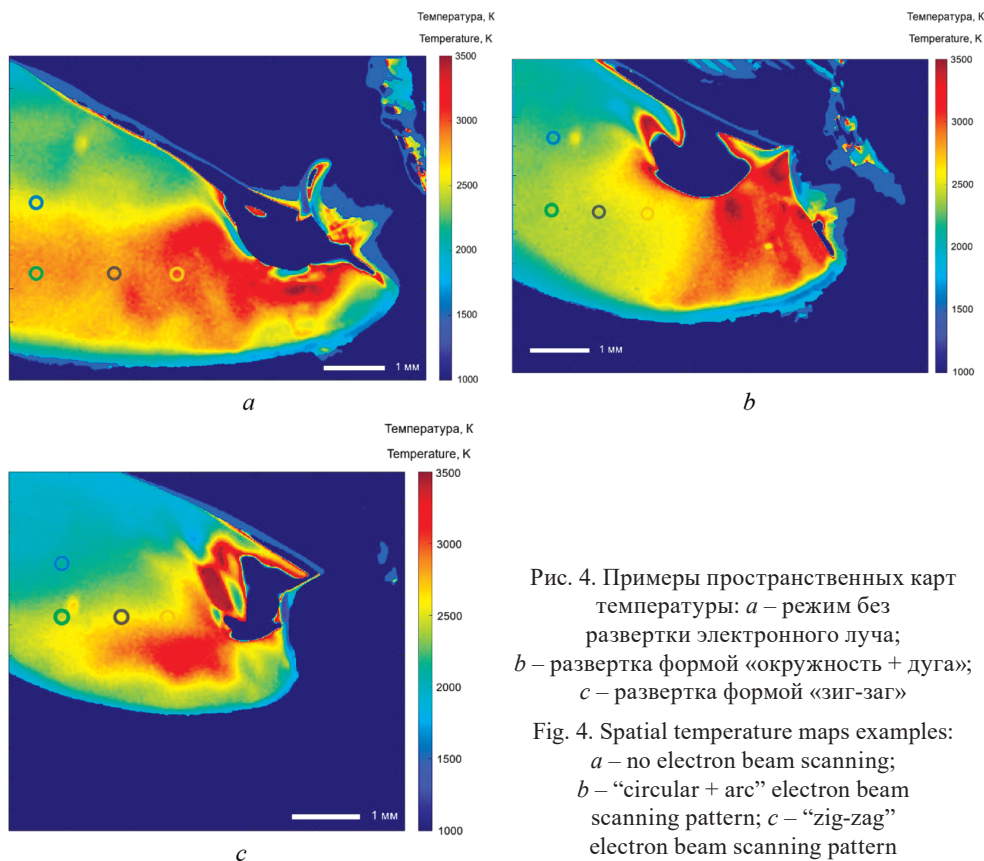


Рис. 4. Примеры пространственных карт температуры: *a* – режим без развертки электронного луча; *b* – развертка формой «окружность + дуга»; *c* – развертка формой «зиг-заг»

Fig. 4. Spatial temperature maps examples: *a* – no electron beam scanning; *b* – “circular + arc” electron beam scanning pattern; *c* – “zig-zag” electron beam scanning pattern

¹ ГОСТ 19807–91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006390>

области, где угол между осью наблюдения и нормалью к поверхности валика менее 40° , излучательная способность постепенно возрастает [21], достигая своего максимума к 75° . В свою очередь, при дальнейшем увеличении угла наблюдения излучательная способность начинает значительно падать [25]. В результате величина излучательной способности при движении вдоль поверхности расплава существенно изменяется и нарушает априорное ограничение $\pm 0,1 \cdot \varepsilon(\lambda_r)$, введенное нами ранее. Получается, что истинное значение излучательной способности отличается от определяемого предложенным методом, и потому по краям валика температура также падает резко. Таким образом, в отношении пространственного распределения полученные карты справедливы в области углов наблюдения менее 40° . Вдобавок к этому мы были вынуждены исключить из расчета пиксели, лежащие непосредственно в пятне электронного луча, поскольку во всех спектральных каналах для данной области МПИ ушел в насыщение и восстановить значение температуры невозможно.

Дополнительным источником погрешности выступает отраженное излучение. Поверхность жидкого металлического расплава является сравнительно гладкой и может обладать выраженной зеркальной составляющей отражения. Поэтому регистрируемый камерой сигнал может включать не только собственное тепловое излучение поверхности, но и отраженное излучение от нагретых областей технологической зоны. В настоящей работе этот вклад явно не выделялся, что ограничивает точность абсолютного определения температуры. Однако при неизменной геометрии наблюдения в пределах одной серии измерений относительная динамика температурного поля сохраняет диагностическую информативность.

На рис. 5 приведены зависимости температуры от времени эксперимента в некоторых точках, отмеченных на рис. 4 цветными маркерами.

По зависимостям температуры можно отметить, что во всех трех случаях алгоритм коррекции интенсивности в зависимости от загрязнения показал свою работоспособность даже с учетом того, что между этими наборами данных были зарегистрированы дополнительные наборы данных, не показанные в статье. Температура ванны расплава в каждом из рассмотренных наборов данных лежит в интервале более 2000 К, что, в свою очередь, превосходит температуру плавления ВТ6 – 1923 К (1650°C). Таким образом, мультиспектральная камера была настроена корректно и в пределах поля зрения наблюдается только жидкая фаза в ванне расплава на фоне холодной подложки.

Также стоит отметить, что на графиках на рис. 5, *b*, *c* наблюдается периодичность зависимости температурного режима процесса от его продолжительности, что соответствует изменению

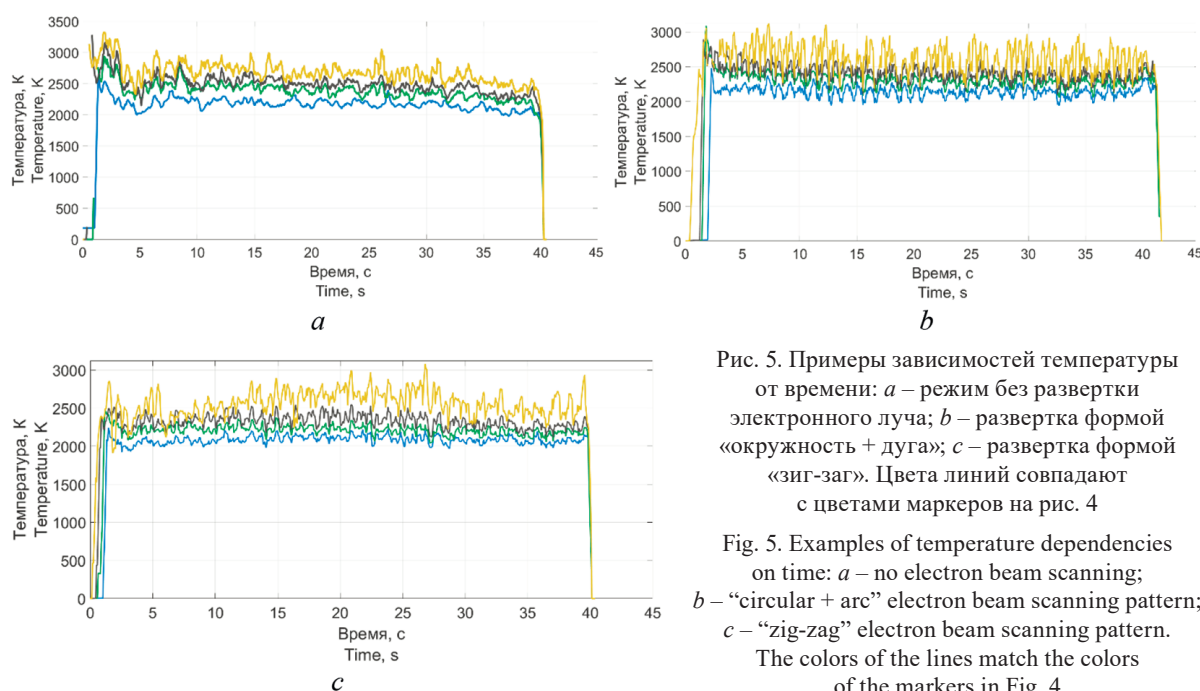


Рис. 5. Примеры зависимостей температуры от времени: *a* – режим без развертки электронного луча; *b* – развертка формой «окружность + дуга»; *c* – развертка формой «зиг-заг». Цвета линий совпадают с цветами маркеров на рис. 4

Fig. 5. Examples of temperature dependencies on time: *a* – no electron beam scanning; *b* – “circular + arc” electron beam scanning pattern; *c* – “zig-zag” electron beam scanning pattern. The colors of the lines match the colors of the markers in Fig. 4

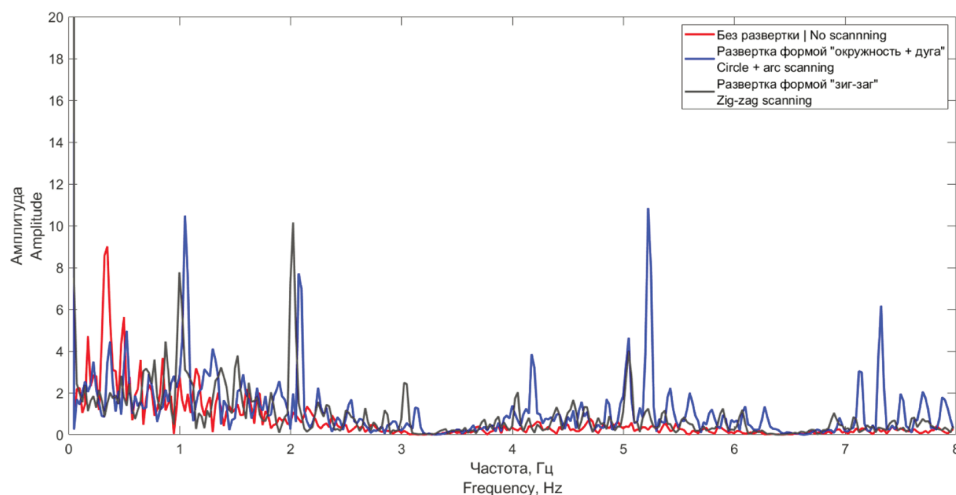


Рис. 6. Примеры амплитудных спектров зависимостей температуры

Fig. 6. Examples of amplitude spectra of temperature dependences

температуры во времени в силу развертки электронного луча. В режиме развертки луч перемещается в пределах поля зрения и проходит в окрестностях точек, выделенных маркерами, изменяя локальное температурное значение. Среди использованных режимов наиболее выражено этот эффект наблюдался для развертки формой «окружность + дуга» (см. рис. 5, *b*). Для развертки формой «зиг-заг» (см. рис. 5, *c*) в интервале между 5 и 10 с можно отметить снижение интенсивности нагрева в связи с локальным дефектом проволоки.

Примеры амплитудных спектров сигналов температуры без развертки и с развертками формой «окружность + дуга» и «зиг-заг» приведены на рис. 6. Для наглядности спектры показаны в одних и тех же координатах. В режиме без развертки, за исключением низких частот (менее 1 Гц), никаких характерных колебаний выявлено не было. В режиме развертки формой «окружность + дуга» наиболее интересны пики 5,225 и 7,325 Гц – это частоты «дуги» и «окружности», которые описывает электронный луч в ходе сканирования.

Закключение. Представлены результаты апробации метода спектральной термографии и устройства для его применения в ходе нескольких экспериментов по ЭЛАФ. В процессе апробации алгоритм коррекции полученного сигнала в зависимости от загрязнения защитного стекла мультиспектральной камеры продемонстрировал свою работоспособность. Полученные значения температуры соответствуют паспортным данным сплава ВТ6. По полученным данным можно частично оценить характерные частоты режима развертки.

С использованием предложенного метода достигается высокая повторяемость результатов регистрации распределения относительных значений температур в ванне расплава. Применение мультиспектральной регистрации в четырех каналах позволяет учитывать спектральные особенности излучения и выполнять восстановление излучательной способности в каждом пикселе изображения, что повышает точность температурного картирования по сравнению с яркостными термографическими методами.

В то же время пространственные температурные карты получились в некоторой мере искаженными. Результаты термографирования существенно зависят от условий регистрации, в частности от угла наблюдения поверхности ванны расплава. Используемая в работе модель восстановления излучательной способности при больших углах наблюдения демонстрирует ограниченную применимость и требует дальнейшего развития для снижения погрешности абсолютного измерения температуры и уменьшения зависимости результатов от геометрии наблюдения.

Кроме того, в ходе экспериментов мультиспектральная камера осуществляла регистрацию кадров на частоте 16 Гц, что соответствовало максимуму пропускающей способности интерфейса обмена данными «мультиспектральная камера – ПК» при наибольшем разрешении и разрядности аналого-цифрового преобразователя, то есть обеспечивала наилучшее качество изображения. При программном снижении качества регистрируемых изображений при помощи таких инстру-

ментов, как выбор некоторой конечной области интереса меньшего размера либо объединение соседних пикселей сенсора мультиспектральной камеры с кратным снижением разрешения, возможно получить большую частоту кадров и обеспечить отслеживание пятна электронного луча с гораздо лучшим временным разрешением.

Список использованных источников

1. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review / L. Zhou, J. Miller, J. Vezza [et al.] // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, № 9. – Art. ID 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Gibson, I. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York: Springer, 2014. – XXII, 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
3. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing / Z. Chen, C. Han, M. Gao [et al.] // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2022. – Vol. 17, № 2. – P. 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
4. Влияние условий термоциклирования в процессе аддитивного производства заготовок из нержавеющей стали и силумина на их микроструктуру / И. Л. Поболь, А. А. Бакинский, М. К. Степанкова [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2018. – Т. 4. – С. 133–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-133-138>
5. Логинова, И. С. Исследование формирования структуры в процессе лазерной обработки алюминиевых сплавов, предназначенных для аддитивных технологий: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Логинова Ирина Сергеевна; Нац. исслед. технол. ун-т «МИСиС». – М., 2019. – 157 л.
6. Какорин, Д. Д. Автоматизация технологического процесса аддитивного производства металлических изделий послонной электродуговой наплавкой: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.3 / Какорин Даниил Дмитриевич; Твер. гос. техн. ун-т. – Тверь, 2025. – 158 л.
7. Geometrical Influence on Material Properties for Ti6Al4V Parts in Powder Bed Fusion / F. Nahr, M. Rasch, C. Burkhardt [et al.] // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2023. – Vol. 7, № 3. – Art. ID 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030082>
8. Paolini A. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods / A. Paolini, S. Kollmannsberger, E. Rank // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 30. – Art. ID 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
9. Alhijaili A. Teams of robots in additive manufacturing: a review / A. Alhijaili, Z. M. Kilic, A. N. P. Bartolo // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2023. – Vol. 18, № 1. – Art. ID e2162929. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2162929>
10. Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation / V. Mamuschkin, A. Haeusler, C. Engelmann [et al.] // *Journal of Laser Applications*. – 2017. – Vol. 29, № 2. – Art. ID 022409. <https://doi.org/10.2351/1.4983515>
11. Fast Multi-Wavelength Pyrometer for Dynamic Temperature Measurements / R. Belikov, D. Merges, D. Varentsov [et al.] // *International Journal of Thermophysics*. – 2024. – Vol. 45, № 2. – Art. ID 29. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03323-x>
12. Снопко, В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В. Н. Снопко; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физики им. Б. И. Степанова. – Мн.: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
13. Radiometric Techniques for Emissivity and Temperature Measurements for Industrial Applications / E. M. Vuelban, F. Girard, M. Battuello [et al.] // *International Journal of Thermophysics*. – 2015. – Vol. 36, № 7. – P. 1545–1568. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1901-8>
14. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum / X. P. Ding, H. M. Li, J. Q. Zhu [et al.] // *Infrared Physics & Technology*. – 2017. – Vol. 81. – P. 166–169. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.017>
15. Vallabh C. K. P. Melt pool temperature measurement and monitoring during laser powder bed fusion based additive manufacturing via single-camera two-wavelength imaging pyrometry (STWIP) / C. K. P. Vallabh, X. Zhao // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 79. – P. 486–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.058>
16. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera / A. J. Myers, G. Quirarte, F. Ogoke [et al.] // *Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 73. – Art. ID 103663. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103663>
17. Temperature measurement in laser–metal processing using optical sensing: Radiometric calibration and validation of a multispectral camera / R. Dai, A. Cohen, T. Stoll [et al.] // *Measurement*. – 2025. – Vol. 242. – Art. ID 115896. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115896>
18. Four-Wavelength Thermal Imaging for High-Energy-Density Industrial Processes / A. Bykov, A. Zolotukhina, M. Poliakov [et al.] // *Journal of Imaging*. – 2025. – Vol. 11, № 6. – Art. ID 176. <https://doi.org/10.3390/jimaging11060176>
19. Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions / J. C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright [et al.] // *SIAM Journal on Optimization*. – 1998. – Vol. 9, № 1. – P. 112–147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
20. Goldsmith, A. *Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials: in 5 vols.* / A. Goldsmith, T. E. Waterman, H. J. Hirschhorn. – New York: Macmillan, 1961–1963. – 5 vols.
21. *Fundamentals of heat and mass transfer.* / F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman [et al.]. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010. – 997 p.
22. Gulyaev, I. P. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions / I. P. Gulyaev, A. V. Dolmatov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 116. – P. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084>
23. Власов, А. И. *Физико-химические основы приборостроения: учеб. пособие* / А. И. Власов, В. П. Жалнин, К. В. Селиванов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 611 с.

24. Heat and mass transfer in electron beam additive manufacturing / X. Lai, G. Yang, Y. Wang, Z. Wei // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2023. – Vol. 259. – Art. ID 108613. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108613>
25. Свет, Д. Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ / Д. Я. Свет. – М.: Металлургия, 1964. – 134 с.

References

1. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 9, art. ID 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York, Springer, 2014. XXII, 459 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
3. Chen Z., Han C., Gao M., Kandukuri S. Y., Zhou K. A review on qualification and certification for metal additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 382–405. <https://doi.org/10.1080/17452759.2021.2018938>
4. Pobol I. L., Bakinovskiy A. A., Stepankova M. K., Burin A. N., Gupko A. D. The influence of thermal cycling conditions during additive manufacturing of stainless steel and silumin blanks on their microstructure. *Litje i metallurgija = Foundry Production and Metallurgy*, 2018, vol. 4, pp. 133–138 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-4-133-138>
5. Loginova I. S. *Study of Structure Formation During Laser Processing of Aluminum Alloys Intended for Additive Technologies* [dissertation]. Moscow, 2019. 157 p. (in Russian).
6. Kakorin D. D. *Automation of the Technological Process of Additive Manufacturing of Metal Products by Layer-by-Layer Electric Arc Surfacing* [dissertation]. Tver, 2025. 158 p. (in Russian).
7. Nahr F., Rasch M., Burkhardt C., Renner J., Baumgärtner B., Hausotte T., Körner C. [et al.]. Geometrical Influence on Material Properties for Ti6Al4V Parts in Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2023, vol. 7, no. 3, art. ID 82. <https://doi.org/10.3390/jmmp7030082>
8. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30, art. ID 100894. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
9. Alhijaili A., Kilic Z. M., Bartolo A. N. P. Teams of robots in additive manufacturing: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, vol. 18, no. 1, art. ID e2162929. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2162929>
10. Mamuschkin V., Haesler A., Engelmann C., Olowinsky A., Aehling H. Enabling pyrometry in absorber-free laser transmission welding through pulsed irradiation. *Journal of Laser Applications*, 2017, vol. 29, no. 2, art. ID 022409. <https://doi.org/10.2351/1.4983515>
11. Belikov R., Merges D., Varentsov D., Major Z., Neumayer P., Hesselbach P., Schanz M., Winkler B. Fast Multi-Wavelength Pyrometer for Dynamic Temperature Measurements. *International Journal of Thermophysics*, 2024, vol. 45, no. 2, art. ID 29. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03323-x>
12. Snopko V. N. *Fundamentals of Pyrometry Methods Based on Thermal Radiation Spectrum*. Minsk, B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 1999. 224 p. (in Russian).
13. Vuelban E. M., Girard F., Battuello M., Nemeček P., Maniur M., Pavlásek P., Paans T. Radiometric Techniques for Emissivity and Temperature Measurements for Industrial Applications. *International Journal of Thermophysics*, 2015, vol. 36, no. 7, pp. 1545–1568. <https://doi.org/10.1007/s10765-015-1901-8>
14. Ding X. P., Li H. M., Zhu J. Q., Wang G. Y., Cao H. Z., Zhang Q., Ma H. L. Application of infrared thermography for laser metal-wire additive manufacturing in vacuum. *Infrared Physics & Technology*, 2017, vol. 81, pp. 166–169 <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.12.017>
15. Vallabh C. K. P., Zhao X. Melt pool temperature measurement and monitoring during laser powder bed fusion based additive manufacturing via single-camera two-wavelength imaging pyrometry (STWIP). *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 79, pp. 486–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.058>
16. Myers A. J., Quirarte G., Ogoke F., Lane B. M., Uddin S. Z., Farimani A. B., Beuth J. L., Malen J. A. High-resolution melt pool thermal imaging for metals additive manufacturing using the two-color method with a color camera. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 73, art. ID 103663. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103663>
17. Dai R., Cohen A., Stoll T., Wudy K., Kizel F. Temperature measurement in laser–metal processing using optical sensing: Radiometric calibration and validation of a multispectral camera. *Measurement*, 2025, vol. 242, art. ID 115896. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115896>
18. Bykov A., Zolotukhina A., Poliakov M., Belykh A., Asyutin R., Korneeva A., Batshev V., Khokhlov D. Four-Wavelength Thermal Imaging for High-Energy-Density Industrial Processes. *Journal of Imaging*, 2025, vol. 11, no. 6, art. ID 176. <https://doi.org/10.3390/jimaging11060176>
19. Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E. Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 1998, vol. 9, no. 1, pp. 112–147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
20. Goldsmith A., Waterman T. E., Hirschhorn H. J. *Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials: in 5 volumes*. New York: Macmillan, 1961–1963.
21. Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2010. 997 p.
22. Gulyaev I. P., Dolmatov A. V. Spectral-brightness pyrometry: Radiometric measurements of non-uniform temperature distributions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 116, pp. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.084>
23. Vlasov A. I., Zhalnin V. P., Selivanov K. V. *Physicochemical Foundations of Instrument Making: Textbook*. Moscow, BMSTU, 2024. 611 p. (in Russian).
24. Lai X., Yang G., Wang Y., Wei Z. Heat and mass transfer in electron beam additive manufacturing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, vol. 259, art. ID 108613. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108613>
25. Svet D. Ya. *Thermal Radiation of Metals and Certain Substances*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1964. 134 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

УДК 537.871.3



Оригинальная статья

С. С. Грабчиков^{1*}, Е. А. Грабчикова¹, А. П. Драпезо², Т. И. Зубарь^{1*},
О. Д. Канафьев¹, А. В. Лосев², А. В. Михайлов³, Г. А. Русецкий¹

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь

²ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор»,
ул. Новаторская, 2Б, офис 204, 220053, Минск, Республика Беларусь

³Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ, НАВЕДЕННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Аннотация. Рассмотрена проблема электромагнитной экологии, ее актуальность для электротранспортных средств. Проведено исследование эффективности электромагнитного экранирования новыми материалами – многослойными структурами градиентного и симметричного типа. Определены уровни электромагнитных полей, генерируемых экспериментальным электродвигателем в различных режимах эксплуатации. Выполнена оценка эффективности электромагнитного экранирования однослойными сплавами ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, АМАГ172) и сформированных на их основе многослойных структур АМАГ172/Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{80}$ и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Показано, что электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия низкочастотных электромагнитных полей на человека, что позволяет приблизиться к рекомендованным медиками гигиеническим нормативам, обеспечить требования электромагнитной совместимости для нормального функционирования различных электронных блоков и компонентов электромобилей.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, низкочастотные электромагнитные поля, электромагнитная совместимость, электротранспортные средства, многослойные структуры, электромагнитная безопасность

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы, подпрограмма 7 «Развитие электротранспорта».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Грабчиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: gss@physics.by; Грабчикова Елена Александровна – старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: grabchikova_e@bk.ru; Драпезо Александр Петрович – директор ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», e-mail: vgs-05@mail.ru; Зубарь Татьяна Игоревна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>, e-mail: fix.tatyana@gmail.com; Канафьев Олег Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, e-mail: Olegkan96@mail.ru; Лосев Алексей Владимирович – инженер ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», e-mail: vgs-05@mail.ru; Михайлов Андрей Владимирович – заведующий отраслевой лабораторией по исследованиям, проектированию и испытаниям электромобилей и базовых компонентов электропривода научно-инжинирингового центра «Электромеханические и гибридные силовые установки мобильных машин» Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси, e-mail: amikhailau@oim.by; Русецкий Григорий Александрович – научный сотрудник лаборатории теории твердого тела Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, <https://orcid.org/0000-0002-8485-1093> e-mail: rusetsky@physics.by

Вклад авторов: Грабчиков Сергей Степанович – разработка, планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; Грабчикова Елена Александровна – анализ проблемы электромагнитной экологии, ее актуальности для электротранспортных средств; Драпезо Александр Петрович – подготовка и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; Зубарь Татьяна Игоревна – планирование и изготовление экспериментальных образцов, исследование магнитных и электродинамических параметров; Канафьев Олег Дмитриевич – изготовление экспериментальных образцов, проведение испытаний экранирующих конструкций, анализ полученных результатов; Лосев Алексей Владимирович – подготовка и проведение эксперимен-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

тальных ісследований, обработка и анализ полученных результатов; *Михайлов Андрей Владимирович* – разработка, планирование и проведение экспериментальных исследований, анализ полученных результатов; *Русецкий Григорий Александрович* – обработка и верификация экспериментальных данных.

Для цитирования: Разработка материалов электромагнитной защиты и исследование уровней электромагнитных помех, наведенных электродвигателем / С. С. Грабчиков, Е. А. Грабчикова, А. П. Драпезо [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 105–117. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

Поступила в редакцию: 15.07.2025

Доработанный вариант: 20.05.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

**Sergey S. Grabchikov^{1*}, Elena A. Grabchikova¹, Alexander P. Drapezo², Tatiana I. Zubar^{1*},
Oleg D. Kanafyev¹, Alexey V. Losev², Andrey V. Mikhailov³, Grigory A. Rusetskiy¹**

¹State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus,
19, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

²LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”,

2B, office 204, Novatorskaya St., 220053, Minsk, Republic of Belarus

³United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
12, Akademicheskaya St., 220072, Minsk, Republic of Belarus

THE DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR ELECTROMAGNETIC PROTECTION AND THE INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE LEVELS GENERATED BY THE ELECTRIC MOTOR

Abstract. The problem of electromagnetic ecology and its relevance for electric vehicles are considered. The effectiveness of electromagnetic shielding of new materials – multilayer structures of gradient and symmetrical type – has been studied, and the levels of electromagnetic fields generated by the engine of an experimental electric vehicle in various operating modes have been determined. The effectiveness of electromagnetic shielding of single-layer alloys ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, ANMSM172) and multilayer structures ANMSM172/Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{80}$ and $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /Al/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ formed on their basis has been experimentally evaluated. It has been shown that electromagnetic screens based on these materials significantly reduce the levels of low-frequency electromagnetic radiation exposure to humans, which allows us to approach the hygiene standards recommended by doctors and ensure electromagnetic compatibility requirements for the normal functioning of various electronic components and components of electric vehicles.

Keywords: electromagnetic shielding, low-frequency electromagnetic fields, electromagnetic compatibility, electric vehicles, multilayer structures, electromagnetic safety

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the State Program “High-tech technologies and equipment” for 2021–2025, Subprogram 7 “Development of electric transport”.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Sergey S. Grabchikov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: gss@physics.by; *Elena A. Grabchikova* – Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: grabchikova_e@bk.ru; *Alexander P. Drapezo* – Director at LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”, e-mail: vgs-05@mail.ru; *Tatiana I. Zubar* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>, e-mail: fix.tatyana@gmail.com; *Oleg D. Kanafyev* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at State Scientific and Practical Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: Olegkan96@mail.ru; *Alexey V. Losev* – Engineer at LLC “Scientific and Technical Center Vist Group Sensor”, e-mail: vgs-05@mail.ru; *Andrey V. Mikhailov* – Head of the Branch Laboratory for Research, Design and Testing of Electric Vehicles and Basic Electric Drive Components of the Scientific and Engineering Center “Electromechanical and Hybrid Power Plants of Mobile Vehicles” at United Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: amikhailau@oim.by; *Grigory A. Rusetskiy* – Research Fellow of the Laboratory of Solid State Theory at State Scientific and Practical Center of Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-8485-1093>, e-mail: rusetsky@physics.by

Contribution of the authors: *Sergey S. Grabchikov* – the development, planning, and conducting experimental research, analysis of the results obtained; *Elena A. Grabchikova* – the analysis of the problem of electromagnetic ecology and its relevance for electric vehicles; *Alexander P. Drapezo* – the preparation and conduct of experimental research, analysis of the obtained results; *Tatiana I. Zubar* – the planning and production of experimental samples, investigation of magnetic and electrodynamic parameters; *Oleg D. Kanafyev* – the production of experimental samples, testing of shielding structures, analysis of the obtained results; *Alexey V. Losev* – the preparation and conduct of experimental studies, processing and analysis of the obtained results.

ned results; Andrey V. Mikhailov – the development, planning, and conducting experimental research, analysis of the obtained results; Grigory A. Rusetsky – feedback and verification of experimental data.

For citation: Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Mikhailov A. V., Rusetsky G. A. The development of materials for electromagnetic protection and the investigation of electromagnetic interference levels generated by the electric motor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 105–117 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-105-117>

Received: 15.07.2025

Modified: 20.05.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Повсеместное внедрение в повседневную жизнь людей и активная эксплуатация сложного электротехнического оборудования, современных информационных систем, скоростного транспорта и разнообразных бытовых приборов привели к резкому изменению физических характеристик среды обитания. Главным следствием этого процесса стало существенное возрастание интенсивности низкочастотных электромагнитных полей (НЧ ЭМП), что крайне негативно отразилось на электромагнитной экологии человека [1–3]. Масштабы данной проблемы уже вышли на глобальный уровень. Сегодня Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) официально признала устранение вредного влияния искусственных излучений на биосферу одной из самых критических и приоритетных задач, стоящих перед мировым сообществом. Эксперты ВОЗ ввели в обиход термин «электромагнитный смог» и включили его в четверку наиболее опасных факторов, вызывающих катастрофическое загрязнение окружающей среды и угрожающих здоровью населения планеты [4].

В настоящее время во многих странах происходит интенсивный переход на электротранспортные системы передвижения, реализуются национальные программы развития электрических транспортных средств (ЭТС). Однако эксплуатация данных транспортных средств приводит к повышению уровня интенсивности электромагнитного окружения людей, электромагнитной загрязненности. В связи с этим актуальными являются направления исследований, связанные с разработкой методов контроля электромагнитной обстановки, созданием материалов и технологий, обеспечивающих снижение уровня НЧ ЭМП и безопасную электромагнитную обстановку среды обитания человека.

Развитие ЭТС происходит в направлении расширенного применения бортовых электронных систем и специализированных программных комплексов, минимизации их габаритов, увеличения количества и плотности компоновки. Отсутствие электромагнитной совместимости бортовых электронных систем электромобилей может вызвать системный сбой работы и привести к потере функций управления транспортным средством, угрозе безопасности его водителя и пассажиров. В работе [5] установлена типичная зависимость: чем сложнее электрооборудование, тем сложнее обеспечение параметров ЭМС.

Несмотря на важность проблемы, в открытой печати отсутствуют исследования электромагнитной обстановки в электротранспортных средствах. Задачи экранирования при анализе разделяют, как правило, на экранирование электрических, магнитных и переменных ЭМП. Наиболее сложным случаем защиты является экранирование магнитоэлектростатического и низкочастотного электромагнитных полей [6]. Это связано с тем, что в низкочастотной области и для постоянных магнитных полей основную роль играет магнитная составляющая ЭМП, которая обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая составляющая [1]. Для экранирования постоянных и переменных ЭМП обычно используют магнитомягкие материалы (электротехническая сталь, пермаллой, суперпермаллой, аморфные и нанокристаллические металлические сплавы). В области электромагнитной защиты сейчас развивается новое направление, связанное со сложными экранирующими системами – многослойными, составными, композиционными и др. (пат. РФ № 2646439 «Многослойный электромагнитный экран» от 06.03.2018; пат. РФ № 2306635 «Составной комбинированный магнитный экран» от 20.09.2007; пат. США № 7358447 «Electromagnetic interference shields for electronic devices» от 11.03.2004; пат. РФ № 2474890 «Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения» от 10.02.2013 и др.).

В настоящей работе исследованы уровни НЧ ЭМП, генерируемых электродвигателем, разработанным в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, рассмотрены новые материалы электромагнитной защиты – многослойные структуры градиентного ($\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) и симметричного ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) типов, проведена оценка их эффективности экранирования.

Обеспечение электромагнитной безопасности: актуальность поиска решения проблемы и разработки нормативных документов. В современной индустрии транспортного машиностроения стремительный переход к электрической мобильности обострил проблему обеспечения электромагнитной безопасности и экологии внутренней среды автотранспортных средств. Актуальность данной проблемы обусловлена отсутствием гармонизированной нормативно-правовой базы и существенными противоречиями между международными рекомендациями и национальными санитарно-гигиеническими стандартами.

Сегодня в таких технологически развитых странах, как Российская Федерация, Республика Беларусь, США и Япония, отсутствуют профильные государственные стандарты, регламентирующие предельно допустимые уровни низкочастотных электромагнитных полей непосредственно внутри салонов электромобилей. В качестве базовых ориентиров международное сообщество зачастую использует рекомендации Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений (International Commission on Non-Ionizing Radiation – ICNIRP)¹. Согласно данным рекомендациям, максимально допустимые уровни воздействия магнитной индукции в низкочастотном диапазоне имеют частотно-зависимый характер и составляют до 200 мкТл на частоте 40 Гц, до 100 мкТл – на частоте 800 Гц и до 20 мкТл – на частоте 3 кГц [7].

Тем не менее текущие пороговые значения международной комиссии подвергаются жесткой критике со стороны профильного научного сообщества. Многочисленные рецензируемые лабораторные и эпидемиологические исследования указывают на то, что данные рекомендации учитывают преимущественно кратковременные термические и острые стимуляционные эффекты, игнорируя долгосрочные биологические последствия нетепловой интенсивности. В связи с этим более 230 независимых экспертов в области биоэлектромагнетизма подписали международное обращение к Всемирной организации здравоохранения с требованием пересмотра нормативов в сторону их существенного ужесточения.

Национальные нормативно-правовые акты стран – участниц Евразийского экономического союза, в частности Республики Беларусь и Российской Федерации, регламентирующие безопасность среды обитания человека, базируются на превентивном подходе и демонстрируют значительно более жесткие требования к промышленной частоте 50 Гц и постоянным магнитным полям². Санитарные нормы и правила устанавливают жесткий порог для магнитной составляющей электромагнитного поля промышленной частоты. Значение магнитной индукции в местах длительного пребывания человека не должно превышать 5 мкТл, что эквивалентно напряженности поля порядка 4,0 А/м и является в десятки раз более строгим ограничением по сравнению с международными лимитами для близких частот.

В свою очередь гигиенические нормативы в отношении постоянных магнитных полей строго ограничивают техногенные изменения геомагнитного фона, допуская гипогеомагнитное ослабление или локальное усиление поля в жилой и производственной среде не более чем в 1,5 раза относительно естественного магнитного поля Земли, принимаемого за базовый уровень в 60 мкТл. Таким образом, в отрасли формируется выраженный научно-технический парадокс, когда силовые электроустановки, тяговые инверторы, аккумуляторные батареи и системы рекуперации электр

¹ Руководства МКЗНИ по ограничению воздействия переменных электрических, магнитных и электромагнитных полей (до 300 ГГц) / Междунар. комиссия по защите от неионизирующего излучения. URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPEMFgdRus.pdf>

² О специфических санитарно-эпидемиологических требованиях к содержанию и эксплуатации объектов, являющихся источниками неионизирующего излучения: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 4 июня 2019 г. № 360. URL: https://minzdrav.gov.by/upload/dadvfiles/law/постановление_СМ_4%20июня%202019%20г.%20№%20360.pdf (дата обращения: 22.11.2023) ; Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Главного Государственного санитарного врача РФ, 28 янв. 2021 г., № 2 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.11.2023).

тромабилей генерируют в салоне сложные широкополосные низкочастотные поля. Эти излучения по своей интенсивности могут кратно превышать жесткие национальные стандарты для жилой среды, но формально укладываются в рамки устаревших международных нормативов. Данное обстоятельство обуславливает острую необходимость проведения комплексных электромагнитных измерений на борту электрического транспорта, разработки специализированных методов инженерного экранирования и создания целевой национальной нормативной базы.

Экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследователей по уровням ЭМП, генерируемых в электромобилях, расходятся, что, по-видимому, связано с различиями в конструкции электромобилей, мощности их двигателей и материала корпуса [8–12]. Уровни сверхнизкочастотных магнитных полей в электромобилях и рельсовом транспорте варьируются от долей до сотен мкТл, не превышая стандарты ICNIRP, но пиковые значения при разгоне/торможении могут влиять на физическое состояние водителей и пассажиров ЭТС [8; 10; 11]. Основными источниками излучения выступают тяговые батареи и инверторы, создающие наиболее интенсивные поля у пола, а не у головы пассажиров [10]. В качестве мер защиты используются пассивное экранирование (пермаллой) и активные контуры компенсации, однако первые критикуются за массу, а вторые – за сложность конструкции, при этом длительное воздействие полей может нести риски для репродуктивной функции [9]. Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что в диапазоне частот 0–50 кГц генерируемый электромобилями уровень НЧ ЭМП составляет от единиц до сотен мкТл и основная часть магнитной энергии концентрируется в диапазоне частот 0,001–10 Гц. Согласно данным [4], основными факторами, которые определяют уровень ЭМП, генерируемого электрооборудованием транспортных средств, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов ЭТС.

Современные исследования в области медицины и магнитобиологии доказывают, что естественные электромагнитные поля выступают в качестве фундаментального экологического и биотропного фактора, оказывающего непрерывное воздействие на живые организмы [13]. Для минимизации рисков и сохранения здоровья населения профильными медицинскими ведомствами рекомендован гигиенический норматив уровня магнитной индукции НЧ ЭМП в жилой среде, составляющий 0,2 мкТл¹. Превышение этого порога критично, поскольку внешние НЧ ЭМП индуцируют во внутренних средах человеческого организма вторичные электрические поля и токи. Данные наведенные токи напрямую воздействуют на мышечные ткани, периферическую нервную систему и вызывают деполяризацию мембран, что приводит к патологическому изменению уровня возбудимости нейронов центральной нервной системы [14]. Согласно долгосрочным клиническим наблюдениям [15], систематическое и продолжительное пребывание человека в зонах с индукцией переменных магнитных полей в диапазоне от 0,2 до 6 мкТл является доказанной причиной возникновения опасных соматических нарушений. Данный уровень излучения провоцирует развитие онкологических процессов, дисфункцию сердечно-сосудистой системы, астенический синдром, а также выраженное угнетение иммунного статуса и угнетение репродуктивной функции организма. В связи с этим в индустрии транспортного машиностроения возникает острая необходимость разработки эффективных инженерных решений. Для обеспечения регламентированной электромагнитной безопасности водителей и пассажиров требуется оперативный поиск и внедрение экономически доступных методов непрерывного мониторинга параметров ЭМП транспортных систем, а также создание комплексных систем экранирования и защиты пользователей.

В качестве сравнения уровней электромагнитных полей и их влияния на человека можно рассмотреть такой феномен, как магнитные бури. Магнитные бури возникают в результате выброса плазменных потоков на Солнце и мощных возмущений магнитосферы Земли. Сформировалось мнение о зависимости самочувствия людей от магнитных бурь. События геомагнитной активности характеризуются локальными К-индексами [16]. Например, для зоны г. Москва значениям К-индексов 5–6 уровней (характеризуются как магнитная буря) соответствует амплитуда

¹ Как защититься от электромагнитного излучения. URL: <https://www.asutpp.ru/kak-zaschititsya-ot-elektromagnitnogo-izlucheniya.html> (дата обращения: 15.05.2024).

магнитной индукции 70–200 нТл, для 7–9 уровней (сильная магнитная буря) – 200–550 нТл. Отметим, что данные значения магнитной индукции НЧ ЭМП существенно ниже, чем рассмотренные выше уровни ЭМП, генерируемые оборудованием ЭТС [17].

Методика проведения эксперимента. Объектом испытаний исследования стал синхронный электродвигатель, который располагается в передней части подкапотного пространства. Мощность электродвигателя составляет 40 кВт с возможностью 30-секундной перегрузки до 80 кВт. Корпус двигателя изготовлен из алюминия толщиной 1,5 мм. После выхода двигателя на определенные режимы нагрузки (42 и 50 кВт) измерения спектров ЭМП, генерируемых электродвигателем, проводились в зоне силового кабеля питания электродвигателя (зона А), а также в двух точках на поверхности боковой алюминиевой конструкции электродвигателя – в центральной зоне боковой поверхности электродвигателя (зона В), и в верхней точке боковой поверхности – между краем конструкции и корпусом электродвигателя (зона С).

В качестве основы для экспериментальных образцов электромагнитных экранов использовалась плоская конструкция корпуса электродвигателя, расположенная перпендикулярно оси вращения вала двигателя. Максимальный размер конструкции составил 340×220 мм. Для испытаний были изготовлены четыре экспериментальных образца экранирующих конструкций:

I образец – Al;

II образец – Al с двусторонним покрытием из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 120 мкм ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$);

3) III образец – Al с двусторонним покрытием из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 120 мкм и слоем аморфного металлического сплава АМАГ172 толщиной 25 мкм ($\text{АМАГ172}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$);

IV образец – Al с двусторонним покрытием на основе многослойной структуры, состоящей из 120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, 5 мкм Cu и 120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$).

Для измерения спектров НЧ ЭМП использовали анализатор, включавший: измерительный зонд; четырехканальный (синхронный) модуль сигма-дельта АЦП LTR24; блок источников питания и ноутбук. Измерения составляющих индукции магнитного поля (B_x , B_y и B_z) проводились в диапазоне частот от 1 до 55 000 Гц в трех взаимно перпендикулярных ориентациях чувствительных элементов зонда относительно источника ЭМП по каналам – «х», «у» и «z» с частотой опроса 57 000 кГц по каждому каналу. Лучшая визуализация измеряемых сигналов достигалась за счет фильтрации измеряемых ЭМП по частоте от значений ≥ 1 Гц. Данная опция позволяет исключить влияние постоянного магнитного поля. Все приведенные в статье спектры электромагнитного поля имеют одинаковый шаг по осям абсцисс (время с шагом 0,05 с) и ординат (магнитная индукция с шагом 20 мкТл).

Значения результирующей амплитуды составляющих B_x , B_y и B_z оценивались из выражения

$$B_{xyz} = \left(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

Уровень эффективности экранирования (Э) рассчитывался по формуле

$$\mathcal{E} = B_{xyz}^0 / B_{xyz}, \quad (2)$$

где B_{xyz}^0 – значение результирующей магнитной индукции при установке I образца; B_{xyz} – значение результирующей магнитной индукции при установке II, III и IV образцов.

Значения B_{xyz}^0 для алюминиевой конструкции (образец I) в зоне В выбраны в качестве реперных точек, поскольку они определяют уровни помехонесущих полей, генерируемых серийным электродвигателем. При нагрузках 42 и 50 кВт значения B_{xyz}^0 в зоне В составляли 351,9 и 753,9 мкТл соответственно.

Расчет помехонесущих ЭМП выполнен в предположении, что источник переменного магнитного поля может быть представлен в виде точечного магнитного диполя. Если для дальней зоны магнитное поле диполя убывает пропорционально кубу расстояния от центра диполя [1], то магнитная индукция на расстоянии r от боковой поверхности экранирующей конструкции может быть оценена по формуле

$$B(r) = B_0 \left(\frac{A/2}{A/2 + r} \right)^3, \quad (3)$$

где B_0 – значение магнитной индукции на поверхности экранирующей конструкции; $A/2$ – расстояние от центра магнитного диполя до поверхности экранирующей конструкции. Для нашего случая $A = 0,32$ м. Упрощая выражение (3), получим:

$$B = B_0 \left(\frac{A}{A + 2r} \right)^3. \quad (4)$$

Оценка эффективности экранирования однослойных и многослойных структур. Исследования эффективности экранирования материалов, используемых в составе экспериментальной экранирующей конструкции, выполнены на образцах электролитически осажденных сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 100 мкм, аморфных металлических сплавов АМАГ172 состава $\text{Co}_{72}\text{Fe}_5\text{Ni}_{11}\text{Si}_9\text{Mn}_1\text{Cr}_2$ толщиной 25 мкм, составных многослойных структурах $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. При формировании экранов $\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в качестве подложек применялись цилиндрические заготовки алюминия диаметром 45 мм, длиной 200 мм и толщиной 1 мм. При формировании экранов $\text{Al}/\text{АМАГ172}$ лента аморфного сплава АМАГ172 наклеивались внахлест на алюминиевые цилиндрические подложки диаметром 30 мм, длиной 200 мм и толщиной 1 мм. Для оптимизации магнитных свойств аморфная лента отжигалась в вакууме при температуре 300 °С в течение 30 мин.

Оценка эффективности экранирования ($\mathcal{E}$) цилиндрических образцов проводилась по результатам расчетов и измерений отношения напряженностей (индукций) магнитного поля в защищаемой области пространства без экрана $H(B)$ и при наличии его $H_1(B_1)$ [1]:

$$\mathcal{E} = \frac{B}{B_1} = \frac{H}{H_1}. \quad (5)$$

Результаты экспериментальных исследований эффективности экранирования однослойных образцов АМАГ172; $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и многослойных экранов $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ от напряженности постоянного магнитного поля приведены на рис. 1.

В однослойных образцах наблюдались характерные зависимости $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ с максимальными значениями эффективности экранирования ($\mathcal{E}_{\max}$), равными 25÷27 дБ для АМАГ172 в области 140÷180 А/м и 31 дБ для $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ в области 800÷1000 А/м. В многослойных экранах $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ значения $\mathcal{E}_{\max}$ достигали 80÷82 дБ в области 900÷1000 А/м. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что в многослойных структурах градиентного типа $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ имеет место эффект значительного усиления эффективности экранирования по сравнению с однослойными образцами.

Полученный результат имеет важное практическое значение, поскольку позволяет, используя комбинации известных материалов, создавать высокоэффективные экранирующие системы магнитостатических и НЧ ЭМП. Измерения эффективности экспериментальных

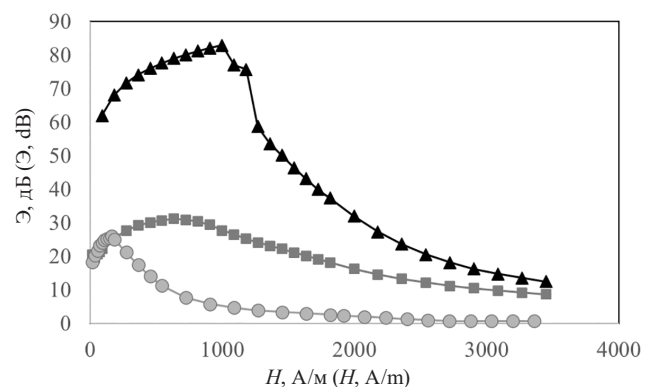


Рис. 1. Экспериментальные зависимости эффективности экранирования сплавов АМАГ172 (●) и $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (■) и многослойной структуры $\text{Al}/\text{АМАГ172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (▲) от напряженности магнитного поля. Толщина слоя: АМАГ172 – 25 мкм, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – 100 мкм

Fig. 1. Experimental dependencies of the shielding effectiveness of ANMSM172 (●) and $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (■) alloys and the $\text{Al}/\text{ANMSM172}-\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ multilayer structure on the magnetic field strength. Layer thickness: ANMSM172 – 25 μm, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – 100 μm

образцов экранирующих конструкций не проводились, поскольку геометрическая форма образцов не соответствует установленным требованиям методик измерения магнитных характеристик [16] и расчетов электродинамических параметров [17].

Результаты измерения уровней генерируемого электродвигателем низкочастотного электромагнитного поля. Алюминий является наиболее широко используемым материалом для изготовления корпусов электродвигателей. Это обусловлено ценным комплексом его физико-технических характеристик, технологичностью процесса изготовления и невысокой стоимостью. Однако с точки зрения электромагнитной защиты и обеспечения ЭМС алюминий неэффективен, поскольку не обеспечивает эффективного экранирования магнитной составляющей НЧ ЭМП.

Измерения составляющих индукции магнитного поля за конструкционной защитой из алюминия (I образец) в центральной области (зона В) показали (рис. 2), что при нагруженной мощности электродвигателя 42 кВт значение результирующей магнитной индукции составило $B_{xyz}^0 = 351,9$ мкТл, при 50 кВт – $B_{xyz}^0 = 753,9$ мкТл. Следует отметить, что при смещении в верхнюю точку экранирующей конструкции (зона С) уровень помехонесущих ЭМП значительно увеличивается. При значениях мощностях нагрузки 42 и 50 кВт значения B_{xyz}^0 составляют 483,7 и 1040,0 мкТл соответственно. Более высокие уровни помехонесущих полей в зоне С, чем в центральной зоне В, связаны с процессами затекания магнитного потока в краевые области экранирующей конструкции.

Уровень электромагнитной помехи вблизи силового кабеля (зона А) при нагрузке электродвигателя мощностью 42 кВт составил 40,2 мкТл, при нагрузке 50 кВт – 71,6 мкТл.

Данные значения индукции переменного ЭМП, генерируемые электродвигателем, достаточно высоки и могут оказывать негативное влияние как на функционирование электрооборудования, так и электромагнитную безопасность пользователей. Несомненно, при удалении от источника уровни помехонесущих полей снижаются, поэтому для каждого месторасположения рецептора и материала электромагнитного экрана уровни ЭМП необходимо оценивать отдельно.

Рассмотрим экспериментально полученные результаты по влиянию дополнительных многослойных структур (образцы II, III и IV) на эффективность экспериментальных экранирующих конструкций, по сравнению со стандартной алюминиевой защитой (образец I).

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (II образец, зона В) при нагрузке 42 кВт представлен на рис. 3. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 108,2$ мкТл, что в 3,26 раза ниже, чем для экспериментального образца I.

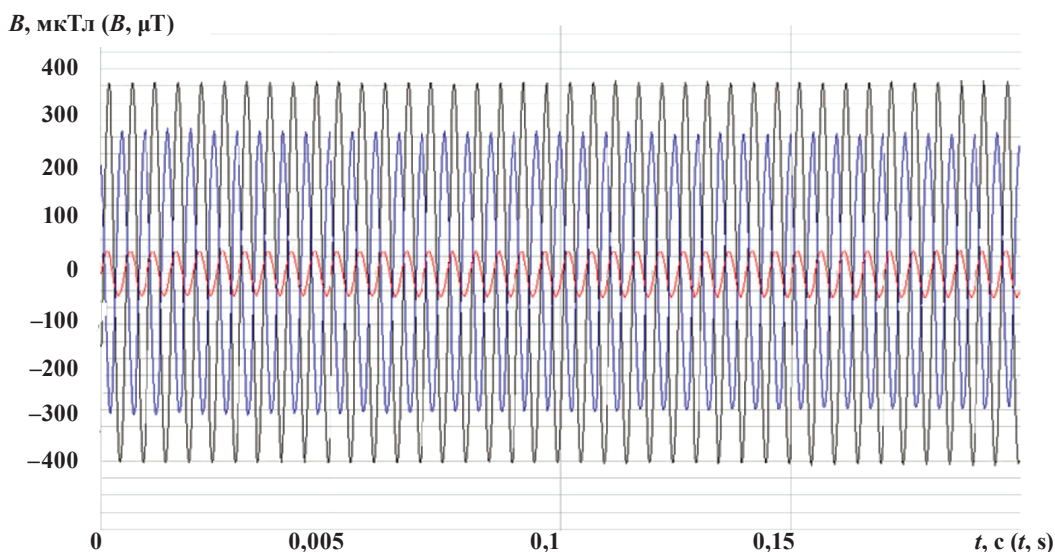


Рис. 2. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции из алюминия $d = 1,5$ мм. Зона В. Нагрузка 42 кВт (образец I)

Fig. 2. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of a $d = 1.5$ mm aluminum shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample I)

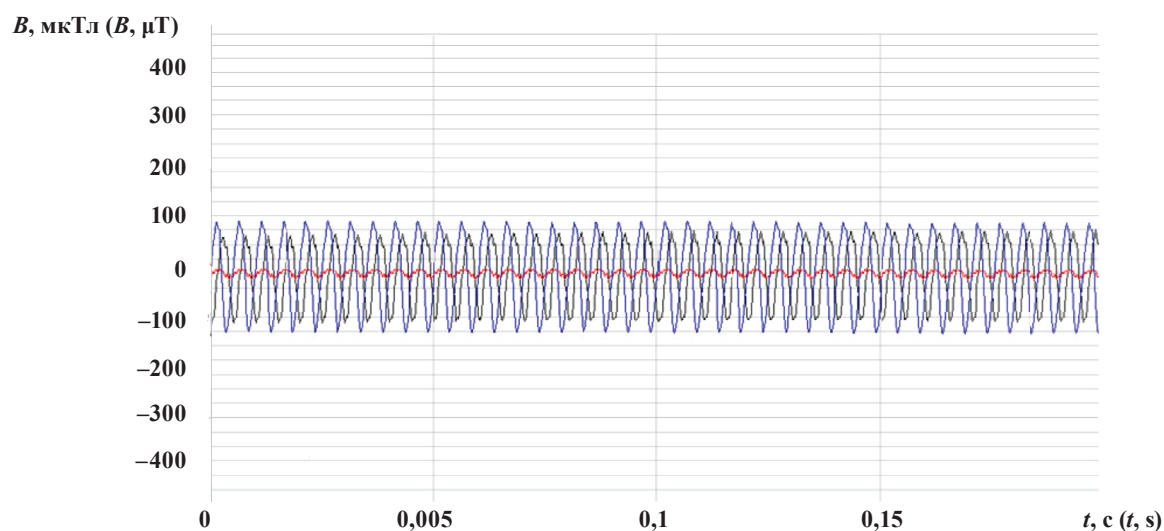


Рис. 3. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (образец II)

Fig. 3. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample II)

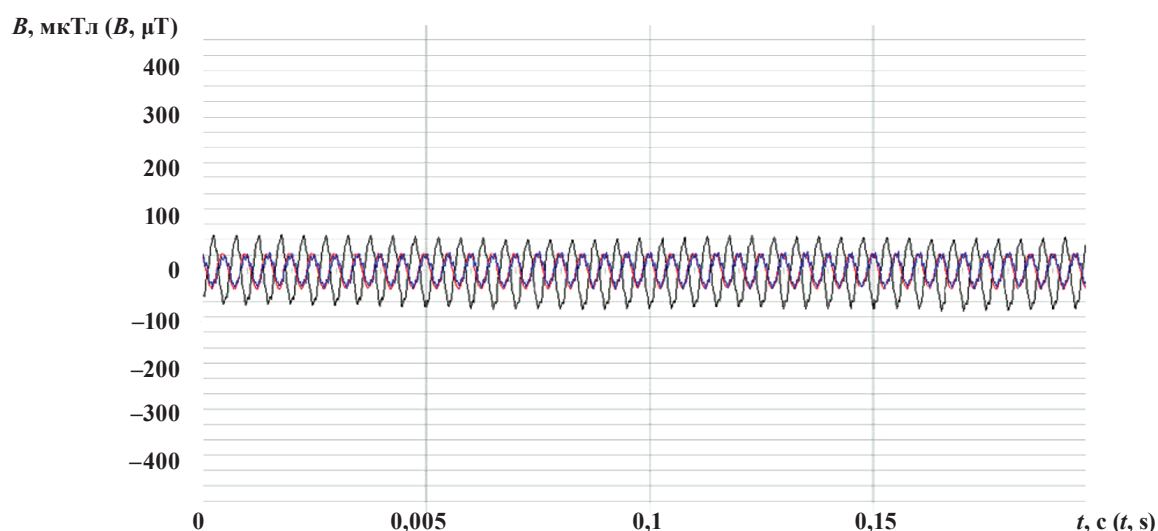


Рис. 4. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центре поверхности экранирующей конструкции АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (образец III)

Fig. 4. Electromagnetic field spectrum generated at the center of the surface of the АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample III)

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (III образец, зона В) при нагрузке 42 кВт показан на рис. 4. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 70,6$ мкТл, что в 4,95 раза ниже, чем для экспериментального образца I.

Спектр ЭМП, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (IV образец, зона В) при нагрузке 42 кВт представлен на рис. 5. Уровень результирующего сигнала составляет $B_{xyz} = 41,1$ мкТл, что в 8,56 раз ниже, чем для экспериментального образца I.

Обобщенные результаты значений составляющих компонент индукции магнитного поля, результирующей индукции магнитного поля и эффективности экранирования в центре поверхности экспериментальных образцов I, II, III и IV для зоны В при нагрузке 42 кВт представлены в табл. 1.

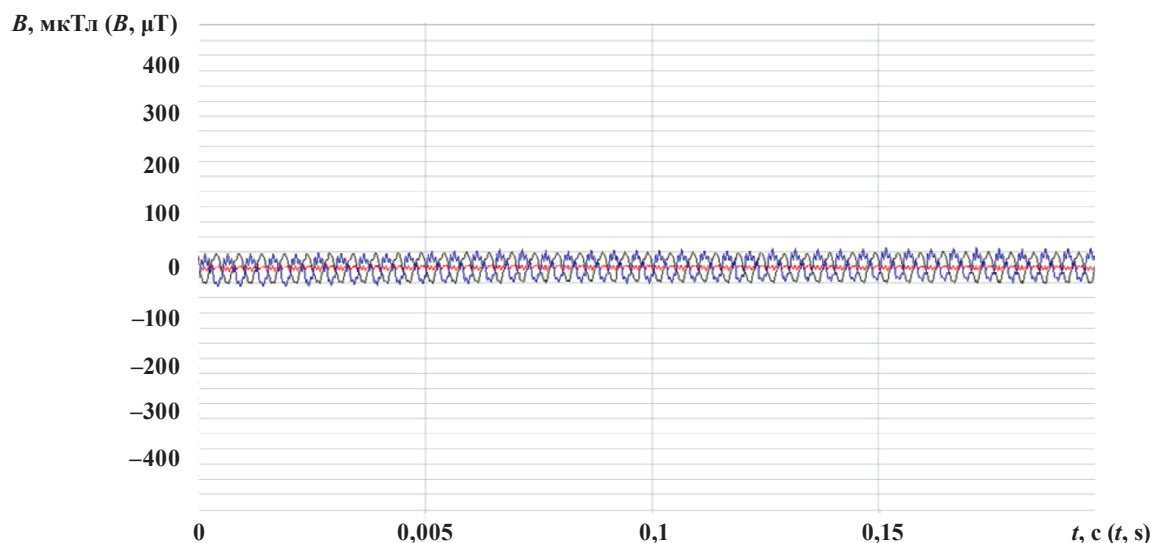


Рис. 5. Спектр электромагнитного поля, генерируемый в центральной точке экранирующей конструкции $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ – зона В. Нагрузка 42 кВт (IV образец)

Fig. 5. Electromagnetic field spectrum generated at the central point of the $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ shielding structure – zone B. Load 42 kW (sample IV)

Т а б л и ц а 1. Значения составляющих компонент индукции магнитного поля (B_x , B_y и B_z), результирующей индукции магнитного поля (B_{xyz}) и эффективности экранирования ($\mathcal{E}$) в центре поверхности экранирующих конструкций различного типа (зона В)

T a b l e 1. Values of the magnetic field induction components (B_x , B_y , and B_z), the resultant magnetic field induction (B_{xyz}), and the shielding effectiveness ($\mathcal{E}$) at the center of the surface of various types of shielding structures (zone B)

Номер эксперимента (Number of a test)	Экспериментальный образец; состав конструкции; условия испытаний (Experimental sample; structure composition; test conditions)	B_x , мкТл (μT)	B_y , мкТл (μT)	B_z , мкТл (μT)	$(B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)$, мкТл ² (μT^2)	B_{xyz} , мкТл (μT)	$\mathcal{E}$, разы (ratio)
1	Образец I; Al; $d = 1,5$ мм, $P = 50$ кВт Sample I; Al; $d = 1.5$ mm, $P = 50$ kW	600	220	400	568 400	753,9	1,0
2	Образец I; Al; $d = 1,5$ мм, $P = 42$ кВт Sample I; Al; $d = 1.5$ mm, $P = 42$ kW	280	30	210	123 400	351,9	1,0
3	Образец II; Al; $d = 1,5$ мм $(120 \text{ мкм Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ кВт Sample II; Al; $d = 1.5$ mm $(120 \text{ }\mu\text{m Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ kW	60	5	90	11 725	108,2	3,26
4	Образец III; Al; $d = 1,5$ мм; $(120 \text{ мкм Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times$ $\times 2 + 25 \text{ мкм АМАГ172}$, $P = 42$ кВт Sample III; Al; $d = 1.5$ mm; $(120 \text{ }\mu\text{m Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times$ $\times 2 + 25 \text{ }\mu\text{m ANSM172}$, $P = 42$ kW	58	29	28	4 989	70,6	4,95
5	Образец IV; Al; $d = 1,5$ мм + $(120 \text{ мкм Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/5 \text{ мкм}$ $\text{Cu}/120 \text{ мкм Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$, $P = 42$ кВт Sample IV; Al; $d = 1.5$ mm + $(120 \text{ }\mu\text{m Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/5 \text{ }\mu\text{m}$ $\text{Cu}/120 \text{ }\mu\text{m Ni}_{80}\text{Fe}_{20}) \times 2$; $P = 42$ kW	28	3	30	1 693	41,1	8,56

П р и м е ч а н и е: d – толщина экранирующей конструкции; P – нагрузка.

N o t e: d – thickness of the shielding structure; P – load.

Как видно из приведенных данных, при использовании алюминиевой конструкции с дополнительными экранами в последовательности II, III и IV образец уровень сигнала уменьшается в 3,26; 4,95 и 8,56 раза соответственно. В верхней точке алюминиевой конструкции (зона С) для аналогичной последовательности уровень сигнала уменьшается в 1,93; 2,18 и 2,2 раза соот-

ветственно. Более низкие значения эффективности экранирования в верхней точке, чем в центральной зоне В, связаны с процессами затекания магнитного потока в краевые области конструкции.

Наиболее высокий уровень электромагнитной защиты был достигнут при использовании алюминиевой конструкции с дополнительным экраном на основе многослойной структуры (120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ /5 мкм Cu /120 мкм $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) $\times 2$ (образец IV). Данный результат связан с большей суммарной толщиной магнитных слоев образца IV (480 мкм – $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) по сравнению с суммарной толщиной магнитных слоев образца III (240 мкм – $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и 25 мкм – АМАГ172).

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов ослабления модулей магнитной индукции при удалении от поверхности экранирующей конструкции для зоны В и различных образцов электромагнитных экранов.

Т а б л и ц а 2. Оценка коэффициентов ослабления и модулей магнитной индукции при удалении от поверхности экранирующей конструкции для зоны В на расстоянии r метров для различных вариантов электромагнитных экранов, выполненная по формуле (4)
 Table 2. Estimation of attenuation coefficients and magnetic induction moduli at a distance r in meters from the shielding structure surface for zone В, calculated by formula (4)

r , м (r , m)	B/B_0	B , мкТл образец I, 50 кВт (B , μT sample I, 50 kW)	B , мкТл образец I, 42 кВт (B , μT sample I, 42 kW)	B , мкТл образец II, 42 кВт (B , μT sample II, 42 kW)	B , мкТл образец III, 42 кВт (B , μT sample III, 42 kW)	B , мкТл образец IV, 42 кВт (B , μT sample IV, 42 kW)
0,0	1,0	753,9	351,9	108,2	70,6	41,1
0,1	0,233 045	175,693	82,00	25,2155	16,453	9,57815
0,2	0,0877915	66,186	30,8938	9,49 904	6,19 808	3,60 823
0,3	0,042 081	31,7249	14,8083	4,55 317	2,97 092	1,72 953
0,4	0,0233 236	17,5837	8,20 758	2,52 362	1,64 665	0,958 601
0,5	0,0142 472	10,7409	5,01 357	1,54 154	1,00 585	0,585 558
0,6	0,00933 081	7,03 449	3,28 351	1,00 959	0,658 755	0,383 496
0,7	0,00643 968	4,85 488	2,26 612	0,696 774	0,454 642	0,264 671
0,8	0,00462 963	3,49 028	1,62 917	0,500 926	0,326 852	0,190 278
0,9	0,00343 908	2,59 272	1,21 021	0,372 109	0,242 799	0,141 346
1,0	0,00262 413	1,97 833	0,923 433	0,283 931	0,185 264	0,107 852

Для примера, на расстоянии 0,1 м для образцов I, II, III и IV значения модуля магнитной индукции соответственно равнялись 82,0086; 25,2155; 16,453 и 9,57815 мкТл. При удалении на расстояние 0,5 м для образцов I, II, III и IV значения B соответственно составляли 5,01357; 1,54154; 1,00585; 0,585558 мкТл. Данные результаты позволяют оценить безопасные, с точки зрения обеспечения ЭМС, расстояния расположения электронных блоков ЭТС относительно электродвигателя при условии знания уровней электромагнитной устойчивости конкретных блоков.

Заключение. На основании измерений уровней индукции генерируемых экспериментальным электродвигателем переменных магнитных полей, выполненных в диапазоне частот от 1 до 55 000 Гц с применением различных экранирующих конструкций получены следующие результаты.

1. Используемые в электромобиле синхронный двигатель и токовые кабели при нагрузках 42 и 50 кВт являются источниками переменных магнитных полей, достигающих значений магнитной индукции 500÷1000 мкТл и 40÷70 мкТл соответственно.

2. Применение многослойных экранов симметричного ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) и градиентного (АМАГ172/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) типов позволяет повысить эффективность экранирующих конструкций на основе алюминия в 3,26; 8,56 и 4,95 раз (зона В) соответственно.

3. Формирование на многослойной структуре $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Al}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ дополнительного слоя толщиной 25 мкм аморфного сплава АМАГ172 увеличивает эффективность экранирования на 52 %, а нанесение двух дополнительных слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ суммарной толщиной 240 мкм увеличивает эффективность на 263 %. Таким образом, существует несколько путей повышения эффективности

электромагнитного экранирования. Оптимальный выбор варианта решения определяется возможностями технологии, а также требованиями к массогабаритным параметрам и физико-техническим характеристикам конечного экрана.

4. Проведенная расчетным методом оценка уровней помехонесущих ЭМП, генерируемых двигателем электроавтомобиля, показала, что на расстоянии 0,5 м значения B_{xyz} равнялись 5,0 мкТл (I образец), 1,5 мкТл (II образец); 1,0 мкТл (III образец) и 0,6 мкТл (IV образец). Данное расположение электронных блоков относительно электродвигателя можно считать безопасным с точки зрения обеспечения ЭМС.

Поскольку исследования уровней электромагнитных полей проводили в стационарном режиме в испытательном центре Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, то проверить характеристики ЭПМ различных режимах силового оборудования не представилось возможным. Для получения более полной картины об уровнях помехонесущих излучений ЭМП электрических транспортных средств необходимо осуществлять дополнительные испытания на полигоне при возможности полной нагрузки и различных режимах работы.

Список использованных источников

1. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – М.: Группа ИТД, 2010. – 470 с.
2. Здоровье человека и электромагнитное поле. Защита населения от ЭМП. – URL: <https://www.ecopole.ru/> (дата обращения: 13.03.2016).
3. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев, В. С. Степанов, Ю. П. Пальцев; под ред. А. К. Демина. – М.: Изд-во Рос. Ассоциации обществ. здоровья, 1997. – 76 с.
4. Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе. Возможные пути ее решения / С. С. Грабчиков, Е. А. Грабчикова, А. П. Драпезо [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 114–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
5. Николаев, П. А. Электромагнитная совместимость автотранспортных средств / П. А. Николаев, Л. Н. Кечиев; под ред. Л. Н. Кечиева. – М.: Грифон, 2015. – 424 с.
6. Глонягин, Ю. В. Элементы теории и расчета магнитостатических полей ферромагнитных тел / Ю. В. Глонягин. – Л.: Судостроение, 1967. – 180 с.
7. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection // Health Physics. – 2010. – Vol. 99, № 6. – P. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>.
8. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека / Н. Г. Птицына, Дж. Виллорези, Ю. А. Копытенко, М. И. Тясто. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 120 с.
9. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats / W. Duan, C. Liu, H. Wu [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2014. – Vol. 35. – P. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
10. Halgamuge, M. N. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars / M. N. Halgamuge, C. D. Abeyrathne, P. Mendis // Radiation Protection Dosimetry. – 2010. – Vol. 141, № 3. – P. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
11. Vedholm, K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles: Abstract No. F-9 / K. Vedholm, Y. K. Hamnerius // Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, Bologna, Italy: Abstract book. – 1997. – Vol. 6. – P. 445.
12. Snyder, M. Magnetic Shielding for Electric Vehicles. Program Review / M. Snyder // Contract DAAE07-93-C-R107. – Army TACOM, Chrysler Corp., 1995. – 56 p. – URL: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>
13. Любимов, В. В. Электромагнитные поля, их биотропность и нормы экологической безопасности / В. В. Любимов, М. В. Рагульская // Успехи современной радиофизики. – 2004. – № 3. – С. 49–60.
14. Стожаров, А. Н. Медицинская экология: учеб. пособие / А. Н. Стожаров. – Минск: Выш. шк., 2007. – 368 с.
15. Основные факторы космической погоды. Мировой центр данных. – URL: <https://mirfakt.ru/osnovnye-factory-kosmicheskoi-pogody-mirovoi-centr-dannyh> (дата обращения: 15.05.2024).
16. Электрические и магнитные измерения / под ред. Е. Г. Шрамкова. – Л.: НКТП СССР, 1937. – 585 с.
17. Реутов, Ю. А. Классические магнитные экраны / Ю. А. Реутов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 72 с.

References

1. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov P. V. *Shielding of Technical Facilities and Shielding Systems*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2010. 470 p. (in Russian).
2. *Human Health and Electromagnetic Fields. Protecting the Population from Electromagnetic Fields*. Available at: <https://www.ecopole.ru> (accessed 13 March 2016) (in Russian).

3. Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev O. A., Stepanov V. S., Pal'tsev Yu. P. *Electromagnetic Pollution of the Environment and the Health of the Russian Population*. Moscow, Publ. House of the Russian Association of Public Health, 1997. 76 p. (in Russian).
4. Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Panasyuk M. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Trukhanov A. V., Fedosyuk V. M. The problem of protecting a person from the effects of low-frequency electromagnetic fields in modern society. Possible ways to solve it. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 114–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
5. Nikolaev P. A., Kechiev L. N. *Electromagnetic Compatibility of Motor Vehicles*. Moscow, Grifon Publ., 2015. 424 p. (in Russian).
6. Glonyagin Yu. V. *Elements of the Theory and Calculation of Magnetostatic Fields of Ferromagnetic Bodies*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1967. 180 p. (in Russian).
7. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>
8. Ptitsyna N. G., Villorezi Dzh., Kopytenko Yu. A., Tyasto M. I. *Magnetic Fields on Electric Vehicles and Human Ecology*. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2010. 120 p. (in Russian).
9. Duan W., Liu C., Wu H., Chen C., Zhang T., Gao P., Luo X. [et al.]. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats. *Bioelectromagnetics*, 2014, vol. 35, pp. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
10. Halgamuge M. N., Abeyrathne C. D., Mendis P. Measurements performed in electric trains – Comparison with ICNIRP Limit and Laboratory Experiments. Measurements and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 2010, vol. 141, no. 3, pp. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
11. Vedholm K., Hamnerius Y. K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles. Abstract No. F-9. *Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, 1997*. Bologna, Italy, 1997, vol. 6, p. 445.
12. Snyder M. *Magnetic Shielding for Electric Vehicles. Program Review*. Contract DAAE07-93-C-R107. Army TACOM, Chrysler Corp., 1995. 56 p. Available at: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>
13. Lyubimov V. V., Ragul'skaya M. V. Electromagnetic Fields, Their Biotropism and Environmental Safety Standards. *Uspekhi sovremennoi radiofiziki* [Advances in Modern Radiophysics], 2004, no. 3, pp. 49–60 (in Russian).
14. Stozharov A. N. *Medical Ecology*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
15. *Main Factors of Space Weather*. World Data Center. Available at: <https://mirfakt.ru/osnovnye-factory-kosmicheskoi-pogody-mirovoi-centr-dannyh/> (accessed 15 May 2024) (in Russian).
16. Shramkov E. G. (ed.). *Electrical and Magnetic Measurements*. Leningrad, Publ. House of the NKTP of the USSR, 1937. 585 p. (in Russian).
17. Reutov Yu. A. *Classic Magnetic Screens*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 72 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>
УДК 669.175.2Оригинальная статья**М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко, С. В. Шишков****Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
пр. Октября, 48, 246029, Гомель, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ БАНДАЖА НА ПРОФИЛЬ ВАЛКА
ПРИ ДВУХВАЛКОВОМ МЕТОДЕ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА**

Аннотация. Представлена модель влияния толщины бандажа валка-кристаллизатора на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава. Установлено, что путем изменения толщины стенок бандажа валков можно корректировать профиль получаемой полосы. Кроме того, увеличение длины распределительного сопла при неизменных условиях способствует равномерному расширению центральной части валка, что связано с формированием однородного термоупругого напряженного состояния в бандаже. Экспериментальные исследования показали, что увеличение длины сопла и уменьшение толщины стенки бандажа снижают неравномерность температурного расширения и уменьшают деформации профиля валка. Эти параметры напрямую влияют на характеристики затвердевшего поверхностного слоя и, как следствие, на качество получаемой полосы после прокатки. Получение тонкой непрерывнолитой полосы позволяет полностью исключить из технологической цепочки ряд операций, оставив лишь станы холодной прокатки и отделочное оборудование. Это дает возможность снизить капитальные затраты и потребление энергоносителей, а также повысить экологическую чистоту производства. Данная технология хорошо согласуется с концепцией «микроразводов» для производства стальной полосы небольшими партиями и определенного сортамента в соответствии с индивидуальными требованиями заказчиков. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании оборудования для двухвалковой быстрой закалки расплава, в частности при конструировании валкового кристаллизатора.

Ключевые слова: термоупругая деформация, валок-кристаллизатор, быстрая закалка, тонкая полоса, разнотолщинность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Верещагин Михаил Николаевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0001-7846-3636>, e-mail: vereschagin@gstu.by; *Черниченко Юрий Дмитриевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Вышая математика» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0002-3682-4402>, e-mail: chern@gstu.by; *Шишков Сергей Владимирович* – старший преподаватель кафедры «Мобильные и технологические комплексы» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», <https://orcid.org/0000-0002-1563-5207>, e-mail: serg_vsh@mail.ru

Вклад авторов: *Верещагин Михаил Николаевич* – формулировка концепции статьи, постановка задачи исследований, проведение исследований по методу двухвалковой быстрой закалки расплава, создание рукописного варианта и редактирование окончательного текста статьи, обобщение результатов исследований и формулировка выводов; *Черниченко Юрий Дмитриевич* – создание варианта теоретической модели и обобщение результатов исследований; *Шишков Сергей Владимирович* – компьютерный расчет теоретических зависимостей температурного режима бандажа валка-кристаллизатора и его деформационного прогиба, построение графического материала для иллюстрации результатов исследований, оформление статьи в электронном виде.

Для цитирования: Верещагин, М. Н. Влияние толщины банджа на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава / М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко, С. В. Шишков // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 118–126. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>

Поступила в редакцию: 28.07.2025

Доработанный вариант: 27.03.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Mikhail N. Vereshchagin, Yuri D. Chernichenko, Sergey V. Shishkov*

Sukhoi State Technical University of Gomel, 48, Octiabria Ave., 246029, Gomel, Republic of Belarus

EFFECT OF THE BANDS THICKNESS ON THE PROFILE OF THE ROLLER IN THE TWO-ROLLER METHOD OF FAST HARDENING OF THE MELT

Abstract. A model is presented for the effect of the thickness of the crystallizer roll bandage on the roll profile in the two-roll method of rapid melt hardening. It is established that by changing the wall thickness of the roll band, the profile of the resulting strip can be adjusted. In addition, an increase in the length of the distribution nozzle under constant conditions contributes to a more uniform expansion of the central part of the roll, which is associated with the formation of a more uniform thermoelastic stress state in the bandage. Experimental studies have shown that an increase in the nozzle length and a decrease in the wall thickness of the bandage reduce the unevenness of the thermal expansion and reduce the deformation of the roll profile. These parameters directly affect the characteristics of the hardened crust and, as a result, the quality of the resulting strip after rolling. Obtaining a thin continuously cast strip makes it possible to completely exclude a number of operations from the technological chain, leaving only cold rolling mills and finishing equipment. This makes it possible to reduce capital costs and energy consumption, as well as improve the environmental friendliness of production. The use of efficient two-roll rapid melt quenching technology provides high quality steel products at low selling prices. This technology fits well with the concept of “micro-mills” for the production of steel strip in small batches and a specific range in accordance with individual customer requirements. The research results can be used in the design of equipment for two-roll rapid melt quenching, in particular in the design of a roll crystallizer.

Keywords: thermoelastic deformation, mold roller, rapid hardening, thin strip, variation in thickness

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Mikhail N. Vereshchagin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department “Metallurgy and Materials Processing Technologies” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0001-7846-3636>, e-mail: vereschagin@gstu.by; *Yuri D. Chernichenko* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Higher Mathematics” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0002-3682-4402>, e-mail: chern@gstu.by; *Sergey V. Shishkov* – Senior Lecturer of the Department “Mobile and Technological Complexes” at Sukhoi State Technical University of Gomel, <https://orcid.org/0000-0002-1563-5207>, e-mail: serg_vsh@mail.ru

Contribution of the authors: *Mikhail N. Vereshchagin* – formulation of the article concept, setting the research objectives, conducting research using the two-roll rapid melt quenching method, creating the manuscript and editing the final text of the article, summarizing the research results and formulating the conclusions; *Yuri D. Chernichenko* – development of a theoretical model and summarizing the research results; *Sergey V. Shishkov* – computer calculation of the theoretical dependencies of the temperature regime of the crystallizer roll bandage and its deformation deflection, creation of graphic material to illustrate the research results, preparation of the article in electronic format.

For citation: Vereshchagin M. N., Chernichenko Yu. D., Shishkov S. V. Effect of the bands thickness on the profile of the roller in the two-roller method of fast hardening of the melt. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 118–126 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-118-126>

Received: 28.07.2025

Modified: 27.03.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Формирование тонкой металлической полосы при использовании двухвалкового метода быстрой закалки расплава представляет собой сложный процесс, который включает в себя множество факторов, связанных с технологией непрерывного литья, в частности продольную и поперечную вариативность толщины изделия. В ходе работы валки подвергаются неравномерному нагреву, что приводит к изменению их первоначальной геометрии. Для обеспечения минимального отклонения по толщине и сохранения высокой плоскостности полосы необходимо стабилизировать зазор между валками.

В настоящее время в ряде стран наблюдается повышенный интерес к технологии двухвалковой быстрой закалки расплава, применяемой для получения изделий с неравноосной микроструктурой. Это объясняется упрощенной схемой производства и снижением как энергетических, так и финансовых затрат.

Как правило, двухвалковый метод используется преимущественно для производства лент толщиной от 0,2 до 4,0 мм [1–3]. Изготовление тонких полос напрямую из расплава дает возможность исключить большинство промежуточных технологических стадий, оставляя лишь финальную обработку с помощью станов холодной прокатки и отделочных операций. Такой подход позволяет снизить капитальные вложения в 4–10 раз [4; 5].

Ограничения по толщине продукции обусловлены двумя ключевыми факторами. Во-первых, достижение высокой скорости охлаждения (порядка 10^4 – 10^5 °C/c) в зазоре между валками возможно только при эффективном теплоотводе, что устанавливает верхнюю границу толщины. Во-вторых, при производстве очень тонких лент возрастает доля площади контакта с валками относительно объема металла, что ухудшает качество продукции. Дополнительные сложности создают повышенные требования к точности геометрии, качеству поверхности, а также физико-механическим характеристикам получаемых лент. В частности, поперечная неоднородность толщины влияет на равномерность деформации при последующей холодной прокатке.

С экономической и технологической точек зрения важно получать тонкие ленты с минимальными отклонениями по геометрии и форме.

Постановка задачи. Процесс формирования тонкой полосы является результатом комплексного взаимодействия множества факторов, включая продольную и поперечную разнотолщинность, а также особенности технологии непрерывного литья с применением двух валков-кристаллизаторов. Во время работы валки подвергаются неравномерному нагреву, что приводит к изменению их первоначального профиля [6]. Поскольку полоса формируется в узком зазоре между валками, поддержание стабильности этого зазора критически важно для получения изделия с высокой плоскостностью и минимальными перепадами по толщине.

Правильный подбор начального профиля поверхности валков, а также оптимизация толщины и материала водоохлаждаемых бандажей позволяют существенно снизить вариации по толщине в литой полосе [2; 6].

Валки являются одним из самых важных компонентов процесса двухвалковой быстрой закалки расплава, которые определяют качество получаемой ленты и ее стоимость. Управление распределением вытяжки по ширине прокатываемой ленты после ее намораживания решает задачи снижения поперечной разнотолщинности полосы за счет изменения прогиба с помощью тепловой профилировки и износа валков, равномерности охлаждения намораживаемого металла, режимов прокатки.

Изгиб и сплющивание валков при прокатке вызывает неравномерность распределения средних нормальных напряжений поперек очага деформации. Неравномерен по длине бочки и износ валков, что обуславливает изменение установившейся формы зазора между валками.

На величину и характер износа влияют: усилие прокатки, скорость прокатки, условия контактного взаимодействия валков и ленты, шероховатость поверхности валков [7]. Под механизмом износа валков понимается истирание бочки валка вследствие скольжения металла по поверхности валка, образующего очаг деформации, в направлении прокатки [7]. Неравномерность износа по длине бочки валка обуславливается различными силовыми и температурными условиями прокатки, неодинаковой микротвердостью различных участков поверхностного слоя валка.

Существенное влияние на поперечную разнотолщинность оказывает поперечная разнотолщинность подката, то есть вид поперечного профиля намороженного на валки металла, а также его распределение по ширине. Реальные профили поперечного сечения намороженного на валки металла имеют некоторую несимметричность, обусловленную неравномерной выработкой валков и колебаниями температуры по ширине ленты.

Когда исходный подкат имеет выпуклый профиль, а лента после прокатки стала прямоугольной, то центральная часть подката, имевшая большую толщину, подвергается большему обжатию, чем края. Если же исходный подкат имеет вогнутый профиль, а лента после прокатки стала прямоугольной, то в результате пластической деформации по краям ленты возникает волнистость.

Из различных видов профилей быстроокаленной ленты предпочтительным относительно последующего процесса горячей прокатки является выпуклый профиль. При последующей холодной прокатке данная лента хорошо удерживается на средней части прокатных валков и характеризуется минимальной склонностью к образованию местных утолщений. Выпуклый профиль лучше обрабатывается при дрессировке.

В общем случае для получения высокоточных холоднокатаных лент разнотолщинность получаемых после двухвалковой закалки-прокатки расплава полос не должна превышать 0,02–0,08 мм по ширине в зависимости от назначения подката и его толщины [8].

Результаты исследования и их обсуждение. Для получения высокоточных ровных лент необходимо в процессе прокатки регулировать форму межвалкового зазора для обеспечения постоянства вытяжек по ширине лены. Тепловое регулирование профиля валков позволяет влиять на размеры прокатной щели и обеспечивать требуемую форму лент.

Одним из важных элементов процесса двухвалкового метода быстрой закалки расплава является толщина бандажа валка. Бандаж подвергается термоупругой деформации за счет воздействия на него находящегося в межвалковом пространстве теплового поля расплава, а также деформации сжатия валков для обеспечения устойчивого процесса прокатки замороженного металла в валках-кристаллизаторах с достижением геометрических характеристик полосы.

Температурный режим бандажа валка-кристаллизатора при быстрой закалке расплава определяется уравнением теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \Delta T + f(r, \varphi, z, t), \quad (1)$$

где $T(r, \varphi, z, t)$ – текущая температура валка-кристаллизатора; Δ – оператор Лапласа в цилиндрической системе координат; a^2 – коэффициент температуропроводности; $f(r, \varphi, z, t)$ – функция, описывающая действие теплового источника.

Температурное поле валка-кристаллизатора находится в области $r \in (R_1, R_2)$, $\varphi \in (0, 2\pi)$, $z \in (z_1, z_2)$, $F_0 > 0$. Функция $f(r, \varphi, z, t)$ представляется следующим образом [9]:

$$f(r, \varphi, z, t) = \frac{Q_0}{C_p \rho S_0} \delta(r - R_0) [\theta(z - z_1) - \theta(z - z_2)] [\theta(\varphi - \varphi') - \theta(\varphi - \varphi' - 2\varphi_0)], \quad (2)$$

$$\varphi' = \omega \sum_{k=0}^{\infty} (t - t_k) [\theta(t - t_k) - \theta(t - t_{k+1})]; \quad t_k = \frac{2\pi k}{\omega},$$

где $S_0 = z\varphi_0 R_0(z_2 - z_1)$ – область действия источника тепла (расплав, находящийся в межвалковом пространстве).

Физическая модель определяет температурное поле цилиндрической оболочки конечной толщины при действии распределенного теплового источника, который вращается вокруг оси с постоянной угловой скоростью.

Решение уравнения (1) представляется в виде отклонения $\Delta T(r, \varphi, z, t)$ от решения $T = T_0 + \Delta T$ стационарной задачи при граничных условиях [9]:

$$\left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial z} \right|_{z=L} = 0; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial r} + \alpha_2 T_2 \right|_{r=R_2} = \alpha_2 R_2; \quad \left. \frac{\partial T_0}{\partial r} - \alpha_1 T_1 \right|_{r=R_1} = -\alpha_1 T_1. \quad (3)$$

Здесь T_1 , T_2 – температура воздуха и воды; R_1 , R_2 – внутренний и наружный радиусы бандажа ($\delta = R_1 - R_2$ – толщина стенки бандажа валка-кристаллизатора); $\alpha_1 = \frac{K_1}{\lambda}$; $\alpha_2 = \frac{K_2}{\lambda}$ (K_1 , K_2 – коэффициенты теплообмена внутренней поверхности бандажа с водой и теплообмена внутренней поверхности бандажа с воздухом; λ – коэффициент теплопроводности материала бандажа).

Температуру бандажа валка-кристаллизатора находим из решения интегрального уравнения [9]

$$T(r, \varphi, z, t) = \sum_{m,n} \left\{ \left[\int_0^t d\tau \exp \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 (t - \tau) \right] F_{k,m,n}^{(c)}(\tau) T_{k,m,n}^{(c)}(r, \varphi, z) \right] + \right. \\ \left. + \left[\int_0^t d\tau \exp \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 \left[-\alpha^2 \beta_{k,m,n}^2 (t - \tau) \right] F_{k,m,n}^{(s)}(\tau) T_{k,m,n}^{(s)}(r, \varphi, z) \right] \right] \right\}. \quad (4)$$

Численное решение интегрального уравнения (4) для распределения температуры вращающегося банджа валка-кристаллизатора при быстрой закалке расплава показало, что:

1) с ростом коэффициента F_0 (время) увеличение толщины стенки банджа ведет к увеличению амплитуды колебаний его температуры;

2) средняя температура банджа с ростом времени имеет вид плавно возрастающей кривой, которая вырождается в прямую;

3) уменьшение толщины банджа ведет к выравниванию средней температуры, а резкое уменьшение его толщины приводит к установлению квазистационарного режима охлаждения вследствие малости термического сопротивления материала банджа кристаллизатора;

4) распределение средней температуры по длине банджа существенно зависит от длины щели сопла для подачи расплава и толщины стенки банджа [9].

Термоупругая деформация банджа для плоского напряженного состояния находится из распределения температуры вращающегося валка-кристаллизатора. Для определения деформации рассматривается уравнение упругого равновесия в отсутствии тепловых источников и внешних сил [10]:

$$\frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = 0, \quad (5)$$

где σ_{ik} – тензор напряжений:

$$\sigma_{ik} = \frac{E}{1+\nu} \left(U_{ik} + \frac{\nu}{1-2\nu} U_{ll} \delta_{ik} \right); \\ U_{ik} = \frac{1}{E} \left[(1+\nu) \sigma_{ik} - \nu \sigma_{ll} \delta_{ik} \right]; \\ U_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

где E – модуль упругости Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $U_{ll} = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} = \sum U_{ii}$; U_{ik} – тензор деформации.

Смещения в цилиндрической системе координат записываются следующим образом:

$$U_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial r}; \quad U_{\varphi\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{U_r}{r}; \quad U_{zz} = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ 2U_{\varphi z} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \varphi} + \frac{\partial U_\varphi}{\partial z}; \quad 2U_{zz} = \frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r}; \\ 2U_{r\varphi} = \frac{\partial U_\varphi}{\partial z} - \frac{U_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \varphi}; \\ \bar{U} = U_r \bar{e}_r + U_\varphi \bar{e}_\varphi + U_z \bar{e}_z, \quad (7)$$

где $\bar{U}$ – смещения.

Решение уравнений (5)–(7) дает выражение для радиального смещения точек наружной поверхности банджа, которое обусловлено тепловым воздействием расплава [11]:

$$U_r|_{r=R_2} = \frac{2}{3\pi R_2} \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha_0 \int_0^t d\tau \sum_{\substack{k=0,1,\dots \\ m,n=1,2,\dots}}^\infty \exp \left[-a^2 \lambda_{m,n}^{2(k)} (t - \tau) \right] \times \\ \times \frac{1}{\lambda_n^{2(k)}} \cos \beta_m^{(k)} z \left\{ \sin k\varphi F_{k,m,n}^{(c,s)}(\tau) + \cos k\varphi F_{k,m,n}^{(c,c)}(\tau) \right\}. \quad (8)$$

Потенциал термоупругого перемещения наружных точек банджа валка-кристаллизатора определяется по формуле [11]

$$\Delta\psi = \frac{1+\nu}{3(1-\nu)}\alpha_m T, \quad (9)$$

где ψ – потенциал упругого перемещения; α_m – коэффициент теплового расширения металла банджа.

Из выражений (8) и (9) находится тепловая деформация банджа (δ_{th}) валка-кристаллизатора при двухвалковой быстрой закатке расплава.

Данный процесс (закатка расплава) с точки зрения поперечной разнотолщинности может быть представлен в виде:

$$\delta_{сум} = \delta_{th} - \frac{1}{EI} \frac{p_m L^3}{24}, \quad (10)$$

где E – модуль Юнга материала банджа; L – длина банджа; p_m – удельное давление прокатки на мороженного металла; I – момент инерции сечения банджа, $I = \frac{\pi D^4}{64} \left[1 - \frac{(D-2s)^4}{D^4} \right]$; D и s –

наружный диаметр и толщина стенки банджа соответственно. Второй член выражения (10) характеризует упругую податливость очага деформации в радиальном направлении (δ_d) при прокатке на мороженного металла.

Анализируя выражение (10), можно сделать следующие выводы: при значительной толщине стенки банджа упругая податливость очага деформации незначительна, то есть $\delta_{th} \gg \delta_d$ и $\delta_d = \delta_{th}$. При толщине банджа $s \rightarrow 1$ мм тепловая деформация $\delta_{th} \rightarrow 0$. В этом случае преобладает радиальная деформация банджа, причем его продольный профиль будет иметь выпуклый характер.

Данный профиль быстроокаленной ленты является предпочтительным с точки зрения последующего процесса холодной прокатки. В процессе двухвалковой закатки расплава валки неравномерно нагреваются и изменяют свой первоначальный профиль [2].

Стабильный межвалковый зазор при температуре литья очень важен для получения полосы с минимальной разнотолщинностью и хорошей плоскостностью. Подбор начальной профилировки поверхности валка с выбором оптимальной толщины водоохлаждаемого банджа валка позволяет свести к минимуму разнотолщинность литой полосы (рис. 1) [2; 11].

На рис. 2 и 3 представлены результаты теоретических расчетов поперечного профиля банджа валка-кристаллизатора в соответствии с выражением (10).

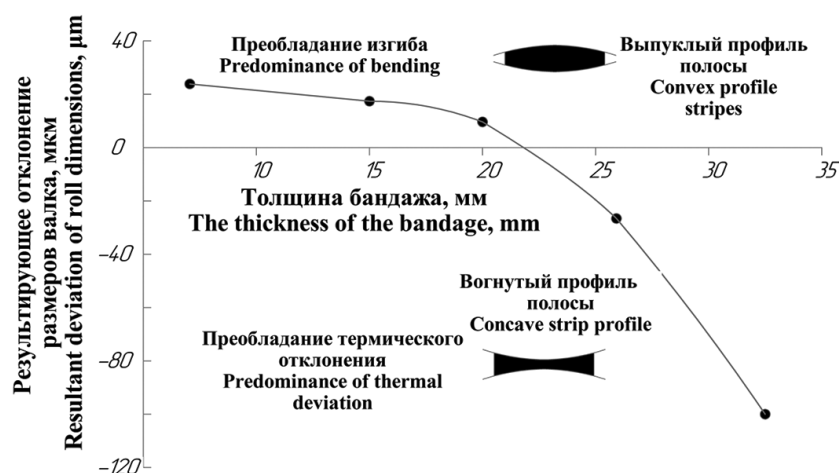


Рис. 1. Влияние толщины банджа валка на общее отклонение размеров валка и профиль бочки
 Fig. 1. Influence of the roll bandage thickness on the overall roll size deviation and barrel profile

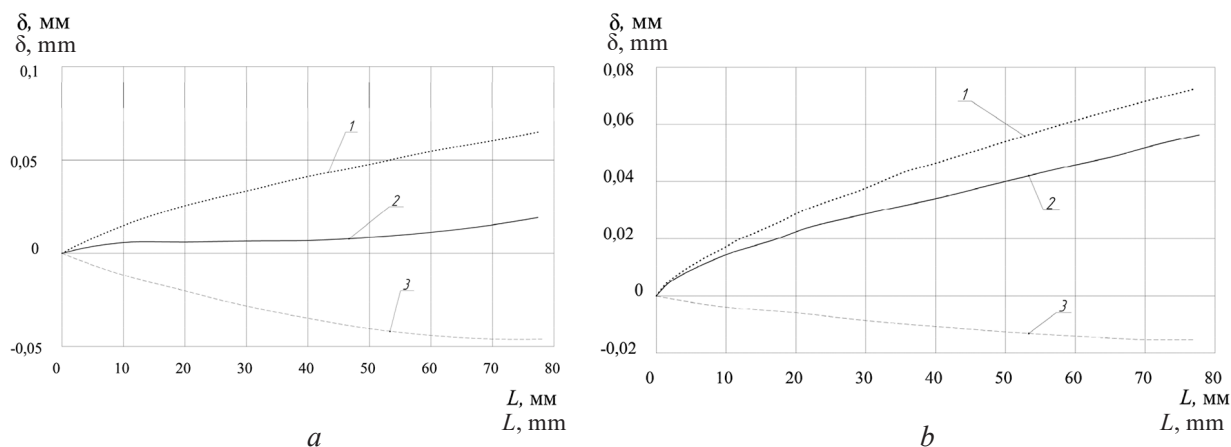


Рис. 2. Термический δ_{th} (кривая 1), деформационный δ_d (кривая 2) и суммарный δ_{sum} (кривая 3) прогибы валков: диаметр валков $D_b = 200$ мм; длина бандажа $L = 80$ мм; толщина бандажа: $a - s = 1.5$ мм, $b - s = 5$ мм

Fig. 2. Thermal δ_{th} (curve 1), deformation δ_d (curve 2), and total δ_{sum} (curve 3) deflections of the rolls: roll diameter $D_b = 200$ mm; bandage length $L = 150$ mm; bandage thickness: $a - s = 1.5$ mm, $b - s = 5$ mm

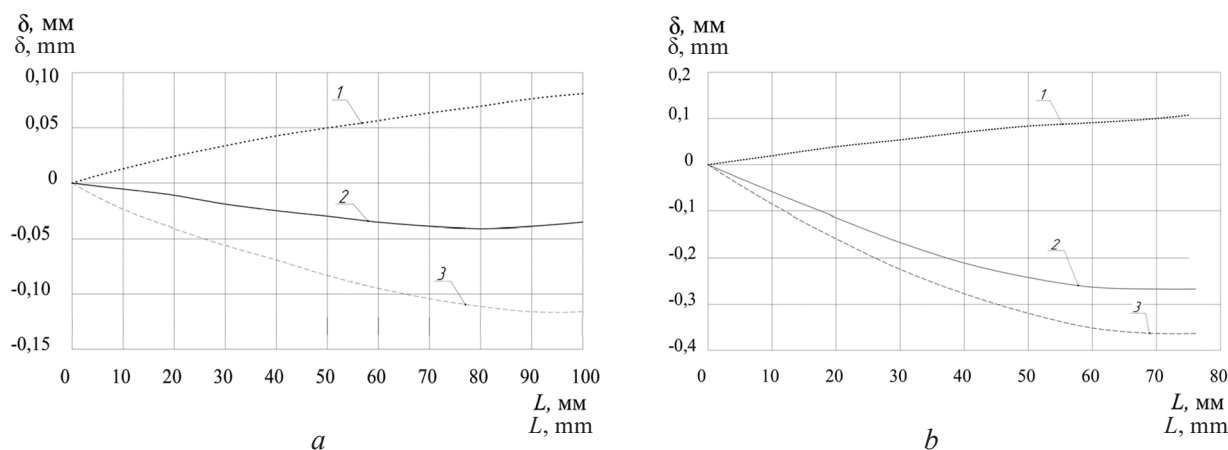


Рис. 3. Термический (δ_{th} , кривая 1), деформационный (δ_d , кривая 2) и суммарный (δ_{sum} , кривая 3) прогибы валков: диаметр валков $D_b = 200$ мм; толщина бандажа: $s = 1.5$ мм; длина бандажа: $a - L = 100$ мм, $b - L = 80$ мм

Fig. 3. Thermal (δ_{th} , curve 1), deformation (δ_d , curve 2), and total (δ_{sum} , curve 3) deflections of the rolls: roll diameter $D_b = 200$ mm; bandage thickness $s = 1.5$ mm; bandage length: $a - L = 100$ mm, $b - L = 80$ mm

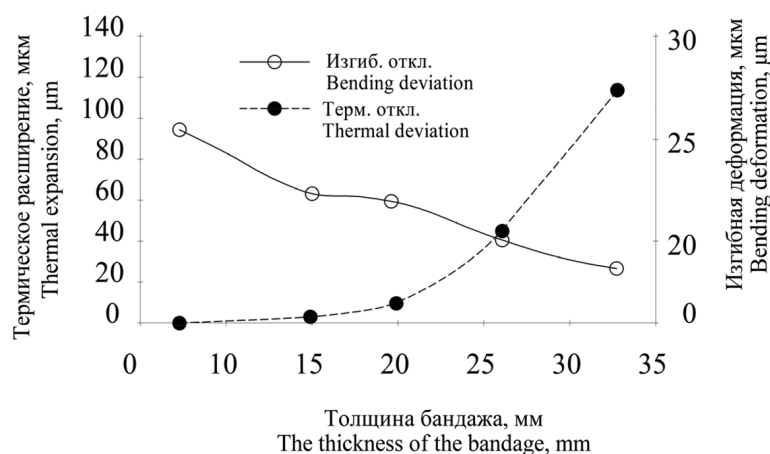


Рис. 4. Влияние толщины бандажа валка на термическое и изгибное отклонение профиля валка [2]

Fig. 4. Influence of the roll bandage thickness on the thermal and bending deviation of the roll profile [2]

Результаты экспериментального исследования влияния толщины бандаж валка-кристаллизатора на тепловую деформацию наружной поверхности последнего и изгибную деформацию валка в радиальном направлении представлены на рис. 4. Они хорошо иллюстрируют теоретические расчеты, представленные выше.

Заключение. Рассмотрена теоретическая модель влияния толщины бандаж валка-кристаллизатора на профиль валка при двухвалковом методе быстрой закалки расплава.

Доказано, что распределение вытяжки по ширине прокатываемой ленты после ее наморачивания обеспечивает снижение поперечной разнотолщинности полосы за счет изменения прогиба с помощью тепловой профилировки и износа валков, равномерности охлаждения наморачиваемого металла и установления режимов прокатки.

Показано, что уменьшение толщины стенки бандаж обуславливает уменьшение тепловой деформации валка и преобладание выпуклости профиля полосы. В свою очередь увеличение длины сопла при прочих равных условиях приводит к уменьшению неравномерности термического расширения валка.

Установлено, что оптимизация толщины стенки бандаж и его длины обеспечивает получение правильного поперечного профиля сечения быстрозакаленной ленты с минимальной разнотолщинностью и плоскостностью.

Получение тонкой непрерывнолитой полосы позволяет полностью исключить из технологической цепочки ряд операций, оставив лишь станы холодной прокатки и отделочное оборудование, что дает возможность снизить капитальные затраты и потребление энергоносителей, а также повысить экологическую чистоту производства. Использование эффективной технологии двухвалковой быстрой закалки расплава обеспечивает получение стальной продукции высокого качества при низких отпускных ценах. Данная технология хорошо согласуется с концепцией «микрозаводов» для производства стальной полосы небольшими партиями и определенного сортамента в соответствии с индивидуальными требованиями заказчиков.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании оборудования для двухвалковой быстрой закалки расплава, в частности при конструировании валкового кристаллизатора.

Список использованных источников

1. Запускалов, Н. М. «Микрозавод» – новая концепция металлургии / Н. М. Запускалов // Черные металлы. – 2004. – № 11. – С. 10–24.
2. Zapuskalov, N. Effect of technological factors on strip profile in twin-roll casting process / N. Zapuskalov, M. Vereschagin // ISIJ International. – 1998. – Vol. 38, № 10. – P. 1107–1113. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.1107>
3. Зюзин, В. И. Технология прокатного производства / В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. – М.: Металлургия, 1991. – 862 с.
4. Economics of strip casting on future steel production / B. Lindorfer, K. Schwaha, J. Spiess, G. Houze // Steel Times. – 1993. – Vol. 22, iss. 7. – P. 304–305, 307.
5. Hendricks, C. Strip casting technology – A revolution in steel industry / C. Hendricks // Metallurgical Plant and Technology International. – 1995. – № 3. – P. 42–49.
6. Blejde, W. Application of Fundamental Research at Project 'M' / W. Blejde, R. Mahapatra, H. Fukase // The Belton Memorial Symposium Proceedings, January 10–11, 2000, Sydney, Australia. – Warrendale: Iron & Steel Society, 2000. – P. 253–261.
7. Zapuskalov, N. Wear of roll surface in twin-roll casting of 4,5% Si steel strip / N. Zapuskalov, M. Vereschagin // ISIJ International. – 2000. – Vol. 40, № 6. – P. 589–596. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.589>
8. Высокоточная прокатка тонких листов / [А. Ф. Пименов, В. П. Полухин, Ю. В. Липухин и др.]. – М.: Металлургия, 1988. – 175 с.
9. Верещагин, М. Н. Температурный режим валка-кристаллизатора при двухвалковой закалке расплава / М. Н. Верещагин, Ю. Д. Черниченко // Весті Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 1993. – № 4. – С. 58–62.
10. Ландау, Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – Изд. 4-е. – М.: Наука, 1987. – 248 с. – («Теоретическая физика», т. VII).
11. Двухвалковая быстрая закалка расплава / М. Н. Верещагин, Н. И. Запускалов, И. В. Агунович, Ю. Д. Черниченко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 298 с.

References

1. Zapuskalov N. M. “Microplant” – a new concept in metallurgy. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2004, no. 11, pp. 10–24 (in Russian).
2. Zapuskalov N., Vereschagin M. Effect of technological factors on strip profile in twin-roll casting process. *ISIJ International*, 1998, vol. 38, no. 10, pp. 1107–1113. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.1107>
3. Zyuzin V. I., Tret'yakov A. V. *Rolling Production Technology*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 862 p. (in Russian).
4. Lindorfer B., Schwaha K., Spiess J., Houze G. Economics of strip casting on future steel production. *Steel Times*, 1993, vol. 22, iss. 7, pp. 304–305, 307.
5. Hendricks C. Strip casting technology – A revolution in steel industry. *Metallurgical Plant and Technology International*, 1995, no. 3, pp. 42–49.
6. Blejde W., Mahapatra R., Fukase H. Application of Fundamental Research at Project ‘M’. *The Belton Memorial Symposium Proceedings, January 10–11, 2000, Sydney, Australia*. Warrendale, Iron & Steel Society, 2000, pp. 253–261.
7. Zapuskalov N., Vereschagin M. Wear of roll surface in twin-roll casting of 4,5% Si steel strip. *ISIJ International*, 2000, vol. 40, no 6, pp. 589–596. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.589>
8. Pimenov A. F., Polukhin V. P., Lipukhin Yu. V., Radyukevich L. V., Traino A. I., Durnev V. D. *High-Precision Rolling of Thin Sheets*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 176 p. (in Russian).
9. Vereshchagin M. N., Chernichenko Yu. D. Temperature conditions of the crystallizer roll during two-roll melt quenching. *Vestsi Akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* [Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 1993, no. 4, pp. 58–62 (in Russian).
10. Landau L. D., Livshits E. M. *Theory of Elasticity*. 3rd ed. Pergamon Press, 1986. 187 p.
11. Vereshchagin M. N., Zapuskalov N. I., Agunovich I. V., Chernichenko Yu. D. *Two-Roll Rapid Melt Quenching*. Gomel, Sukhoi State Technical University of Gomel Publ., 2019. 298 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>
УДК 532.694.1:614.842.615



Оригинальная статья

А. Н. Камлюк*, Э. Г. Говор, А. О. Лихоманов

*Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь*

**ЗАВИСИМОСТЬ ДИСПЕРСНОСТИ НИЗКОКРАТНЫХ ПЕН ОТ ПОЛОЖЕНИЯ
В СЛОЕ ПЕНЫ ПО ВЫСОТЕ**

Аннотация. Проведен комплексный анализ моделей структуры пен низкой кратности, используемых в системах пожаротушения. В качестве наиболее адекватной модели, приближенной к реальным пенам, была выбрана ячеистая модель, занимающая промежуточное положение между сферической и полиэдрической структурами. Основной целью исследования было установление зависимости среднего диаметра пузырьков пены от положения в слое пены по высоте, что является критически важным для понимания механизмов разрушения пены и прогнозирования ее эксплуатационных характеристик. Для сравнения полиэдрических пен, получаемых различными способами, введена новая классификация пен по дисперсному составу с использованием понятий минимального и максимального диаметра пузырьков. Разработана полуэмпирическая модель пен низкой кратности, включающая расчет объемной скорости истечения жидкости по каналам Плато–Гиббса (капиллярам) при установившемся режиме течения и такие характеристики пен, как кратность и устойчивость. Для верификации теоретической зависимости были проведены экспериментальные исследования с использованием пенообразователя «Синтек-6НС», в ходе которых зафиксировано отчетливое разделение пенного столба на зоны с различной дисперсностью и формой пузырьков. Полученная экспериментальная зависимость для среднего диаметра пузырьков пены хорошо согласуется с предложенным авторами уравнением.

Ключевые слова: средний диаметр пузырька, дисперсность пены, кратность пены, объемная устойчивость пены, показатель смачивающей способности, канал Плато–Гиббса, пеногенерирующее устройство

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Камлюк Андрей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель начальника по научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>, e-mail: kan@ucsp.by; Говор Эдуард Геннадьевич – ведущий научный сотрудник отдела научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>, e-mail: govor-098@mail.ru; Лихоманов Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем безопасности Университета гражданской защиты, <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>, e-mail: alexlikh20@gmail.com

Вклад авторов: Камлюк Андрей Николаевич – определение целей, задач исследования, формулировка введения и заключения, проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных, определение закономерностей и зависимостей характеристик пены и физических свойств пенообразователей, из которых она получена, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; Говор Эдуард Геннадьевич – проведение экспериментальных исследований по определению кратности, устойчивости и дисперсности пены, набор текста статьи; Лихоманов Алексей Олегович – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и устойчивости пены, работа с графическим материалом, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Камлюк, А. Н. Зависимость дисперсности низкократных пен от положения в слое пены по высоте / А. Н. Камлюк, Э. Г. Говор, А. О. Лихоманов // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 127–140. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>

Поступила в редакцию: 18.03.2025

Доработанный вариант: 17.07.2025

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Andrei N. Kamluk*, Eduard G. Govor, Alexey O. Likhomanov

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25, Mashinostroiteley St., 220118, Minsk, Belarus*

DEPENDENCE OF DISPERSION OF LOW-EXPANSION FOAM ON THE POSITION IN THE FOAM LAYER BY HEIGHT

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of structural models for low-expansion foams used in fire suppression systems. The cellular model, which occupies an intermediate position between spherical and polyhedral structures, was selected as the most adequate one, closely approximating real foams. The primary research objective was to establish the dependence of the average foam bubble diameter on the position within the foam layer by height. This relationship is crucial for understanding foam breakdown mechanisms and predicting its operational performance. To facilitate the comparison of polydisperse foams produced by different methods, a new classification of foams by dispersion composition was introduced, utilizing the concepts of minimum and maximum bubble diameters. A semi-empirical model for low-expansion foams was developed, incorporating the calculation of the volumetric flow rate of liquid through the Plateau-Gibbs channels (capillaries) under steady-state flow conditions, as well as key foam characteristics such as expansion ratio and stability. Experimental studies using the “Sintek-6NS” foaming agent were conducted to verify the theoretical dependence, revealing a clear stratification of the foam column into zones with varying dispersion and bubble shapes. The obtained experimental dependence for average foam bubble diameter shows good agreement with the equation proposed by the authors.

Keywords: average diameter of foam bubbles, dispersion of foam, foam expansion, volume stability of foam, wetting ability, Plateau–Gibbs border, foam generating device

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the authors: *Andrei N. Kamluk* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Scientific and Innovation Activities at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>, e-mail: kan@ucp.by; *Eduard G. Govor* – Leading Researcher of the Department of Scientific and Innovation Activities at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>, e-mail: govor-098@mail.ru; *Alexey O. Likhomanov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automatic System Security at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>, e-mail: alexlikh20@gmail.com

Contribution of the authors: *Andrei N. Kamluk* – the determination of the aims and objectives of the study, formulation of the introduction and conclusion, carrying out experimental studies and analysis of the experimental data, determination of patterns and dependencies of the characteristics of the foam and the physical properties of the foaming agents, interpretation of the research results, editing the text of the manuscript; *Eduard G. Govor* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate, volume stability and dispersion of foam, writing the text of the manuscript; *Alexey O. Likhomanov* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, working with graphic material, editing the text of the manuscript.

For citation: Kamluk A. N., Govor E. G., Likhomanov A. O. Dependence of dispersion of low-expansion foam on the position in the foam layer by height. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 127–140 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-127-140>

Received: 18.03.2025

Modified: 17.07.2025

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Пены являются чрезвычайно сложными неустойчивыми дисперсными системами. Изучением их фундаментальных свойств занимаются ученые, сфера исследовательских интересов которых находится на стыке химических, физико-математических и технических наук. Наибольшего внимания с точки зрения ликвидации пожаров заслуживают жидкие воздушно-механические низкократные пены (далее – пены) [1, с. 5–13, 275–285, 294–322], которые состоят

из пузырьков газа (размер около 10^{-3} м), разделенных прослойками жидкости [2; 3]. Для получения даже минимально устойчивой пены требуются стабилизаторы, которые будут адсорбироваться на границе раздела газ–раствор. В качестве стабилизаторов используются пенообразователи, основу которых составляют поверхностно-активные вещества (ПАВ). В большинстве случаев пены получаются взбиванием жидкости на поверхности (на оросителях в автоматических установках пенного пожаротушения), выдуванием через отверстия в металлической сетке (в насадках на пожарные стволы) либо насыщением жидкости газом под давлением (в установках генерирования компрессионной пены).

К основным характеристикам пен относят кратность, устойчивость и дисперсность. По кратности пены делятся на пены низкой (от 4 до 20), средней (от 21 до 200) и высокой (более 200) кратности. Под кратностью понимают отношение объема пены к объему водного раствора пенообразователя, из которого она получена [4, с. 20]. Присутствие пенообразователя сдерживает стекание жидкости, отчего процесс разрыва пленки замедляется, но не прекращается полностью. Стеkanie жидкости начинается с момента образования пены под действием гравитационных сил до момента достижения равновесия в дисперсной системе.

Ранее установлено, что устойчивость пены линейно связана с ее кратностью, то есть чем больше кратность, тем более устойчива пена к разрушению при прочих равных условиях. Такая связь объемной устойчивости низкократных пен с их кратностью исследована в [5].

В нашей работе рассмотрены вопросы по выявлению факторов, оказывающих влияние на дисперсность пен, под которой понимается величина, обратная среднему диаметру пузырька (d_{cp}):

$$D = \frac{1}{d_{cp}}. \quad (1)$$

По структуре, в зависимости от диаметра пузырьков, различают монодисперсные и полидисперсные пены, а в зависимости от их геометрической формы – сферические, ячеистые и полиэдрические [6, с. 24–39]. Деление полидисперсных пен на высокодисперсную и низкодисперсную очень условное. Так, в [7] низкодисперсная (малоустойчивая) пена имеет средний диаметр пузырьков $d_{cp} \approx 0,4 \div 1$ мм, а высокодисперсная (устойчивая) – $d_{cp} \approx 0,02$ мм (при кратности $K = 10$). В то же время в [8] под низкодисперсной пеной понимают пену со средним размером пузырьков более 1 мм, а под высокодисперсной – менее 1 мм. В [9] пены делятся уже на четыре вида: низкодисперсная с размером частиц в пределах нескольких миллиметров, высокодисперсная – средний диаметр пузырьков $d_{cp} > 0,1$ мм, мини-пена, у которой $0,05 \text{ мм} \leq d_{cp} \leq 0,1 \text{ мм}$, и микро-пена с $d_{cp} < 0,05$ мм.

В данном исследовании для удобства сравнения полидисперсных пен, получаемых различными способами, используются понятия минимального диаметра (d_{min}) и максимального диаметра (d_{max}) пузырьков:

$$d_{min} = 0,5d_{cp}, \quad d_{max} = 1,5d_{cp}, \quad (2)$$

а классификация ведется относительно значений d_{cp} (рис. 1).

Численные значения d_{cp} , а значит, и дисперсности (D) можно получить для случаев выдувания пузырьков на затопленных (генерирование компрессионной пены) и незатопленных (генерирование пены на сетках в насадках на пожарные стволы) отверстиях, а также при дезинтеграции потока раствора пенообразователя в момент удара о поверхность (генерирование пены на оросителях) на основании теории, представленной в [10]. При генерировании пен описанными выше способами получение монодисперсных пен в чистом виде практически невозможно, так как сразу после образования пена разрушается, жидкость начинает стекать (синерезис), а в результате диффузии воздух из разрушенных пузырьков переходит в соседние, увеличивая их размеры по сравнению с первоначальными, в связи с чем средний диаметр пузырька будет зависеть от положения в слое пены по высоте и меняться со временем. По этой причине строгое математическое описание процессов, протекающих в пенах, в настоящее время затруднено, а для их анализа используются различные модельные структуры, название которых чаще всего определяют

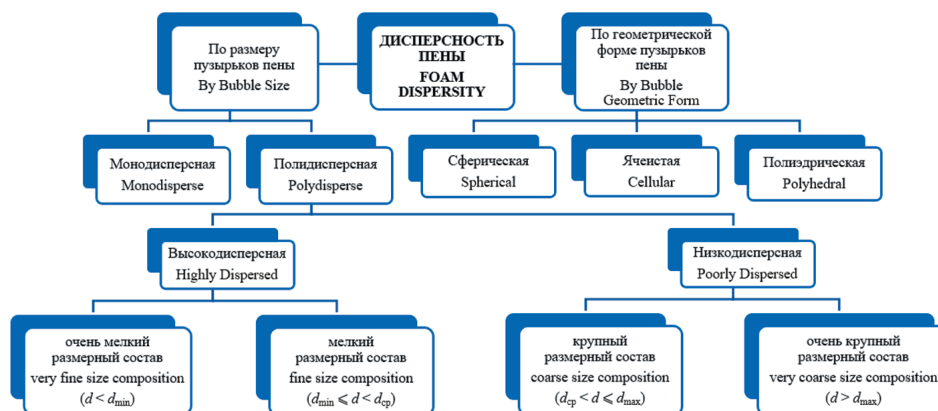


Рис. 1. Классификация пен по дисперсному составу; d – фактический диаметр пузырька, d_{cp} – средний диаметр пузырька, d_{min} – минимальный диаметр пузырька, d_{max} – максимальный диаметр пузырька

Fig. 1. The classification of foams by dispersion composition; d – actual diameter of the bubble, d_{cp} – average diameter of the bubble, d_{min} – minimum bubble diameter, d_{max} – maximum bubble diameter

по геометрической форме пузырьков. Непосредственно такие упрощенные модели позволяют связать важные характеристики пен – кратность, дисперсность и устойчивость, на уровне, достаточном для интерпретации экспериментальных данных.

Модели структуры пен и их анализ. В обзорных работах [2; 3] указывается на зависимость геометрической формы газовых пузырьков от газосодержания (ϕ). Например, пены, которые содержат более 95 % газа, преимущественно имеют форму многогранников – полиэдров, которые часто являются додекаэдрами, в то же время для монодисперсной сферической пены максимальное газосодержание составляет порядка $\phi \approx 0,74$ [11, с. 6]. Сферическая структура соответствует наиболее плотной упаковке газовых пузырьков, имеющих форму шара, что согласуется со значением кратности $K_{min} = 3,86 \approx 4$. Эта величина кратности показывает предел существования сферической структуры пены, ниже которой газожидкостная смесь представляет собой дисперсию не связанных между собой газовых пузырьков. Пены, газосодержание которых принимает промежуточное значение между газосодержанием полиэдрической и сферической структур, относятся к пенам с ячеистой структурой. Чтобы разобраться с процессами, протекающими с момента образования пены, и определить зависимость ее дисперсности от положения в слое пены по высоте и геометрической формы газовых пузырьков, рассмотрим несколько вариантов истечения жидкости из пены (основной фактор разрушения).

Так как синерезис (дренаж) начинается непосредственно в момент образования пены, можно предположить, что течение жидкости происходит по поверхности пленки пузырька под действием силы тяжести, тогда скорость течения будет равна [12, с. 11–13]

$$v_c = \frac{\rho g \delta^2}{6\eta}, \quad (3)$$

где ρ – плотность раствора пенообразователя; δ – толщина пленки пузырька; η – динамическая вязкость раствора пенообразователя.

При таком рассмотрении пенной структуры считается, что вся жидкость сосредоточена в пленках, из которых она постепенно стекает в каналы, поэтому первой моделью пенной структуры была именно пленочная модель, в которой пена представлена в виде системы тонких вертикальных пленок, протяженных на всю высоту пенного столба [6, с. 81].

Связь кратности отдельно взятого газового пузырька пены с его структурными параметрами можно получить из выражения [13, с. 1082]

$$K = \frac{V_B + V_{ж}}{f_1 V_{ж}} \approx \frac{V_B}{f_1 V_{ж}}, \quad (4)$$

где V_B – объем воздуха в пене; $V_{ж}$ – объем жидкости в пене, причем $V_B \gg V_{ж}$; $f_1 = 0,5$ – коэффициент, учитывающий долю вклада пленок для одной элементарной ячейки (пузырька пены).

Для случая сферической монодисперсной пены, исходя из (4), можно записать

$$K = \frac{\pi d_{\text{ср}}^3}{0,5 \cdot 6 \pi d_{\text{ср}}^2 \delta} = \frac{d_{\text{ср}}}{3\delta}. \quad (5)$$

Уравнение (5) связывает такие важные характеристики пены, как кратность и дисперсность, через средний диаметр пузырька пены. Однако такая модель для анализа характеристик пен неудачна, так как объемная скорость течения жидкости по пленкам, имеющим размеры, характерные для реальных пен [14; 15], намного меньше скорости перемещения жидкости по пенным каналам, а значит, большая часть жидкости сосредоточена в каналах, а не в пленках. Поэтому пленочная модель в настоящее время не используется для интерпретации экспериментальных данных.

Лучше описывает синерезис пен каналовая (капиллярная) модель, в которой истечение жидкости происходит из системы вертикальных каналов, протяженных на всю высоту пенного столба [6, с. 83]. В этой модели пенные каналы сверху замкнуты газожидкостными менисками и повторяют форму каналов Плато. Поперечное сечение пенных каналов имеет вид треугольника с вогнутыми внутрь сторонами. Каналовые (капиллярные) модели являются более совершенными по сравнению с пленочными моделями. Однако как в пленочных, так и каналовых моделях пенной структуры отмечается общий недостаток: пенный столб, содержащий огромную сеть каналов, расположенных под различными углами друг к другу, независимо от своей высоты моделируется лишь группой параллельных пленок или каналов. Это приводит к тому, что в моделях не учитывается взаимосвязь механизмов разрушения со структурой пены и, как следствие, полученные зависимости не могут в полной мере отразить экспериментальные факты.

Структура реальных пен, состоящих из множества газовых пузырьков разнообразной формы (от сферической до полиэдрической), слабо похожа на систему вертикальных независимых каналов. Поэтому логичен переход от каналовой к полиэдрической модели пенной структуры – системе взаимосвязанных, беспорядочно ориентированных каналов с поперечным сечением в виде треугольника Плато [6, с. 29]. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму одинаковых полиэдров с «затупленными» ребрами и вершинами, представляя собой усовершенствованную каналовую (капиллярную) модель.

Для полиэдрической пены уравнение для расчета скорости синерезиса имеет следующий вид [6, с. 83; 12, с. 7]:

$$v_c = \frac{\rho g r_k^2}{8\eta}, \quad (6)$$

где r_k – радиус канала (капилляра) Плато–Гиббса.

Для полиэдрической модели структуры пены, если принять в качестве элементарной ячейки пентагональный додекаэдр, уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$K = \frac{7,66a^3}{f_1 n_r \cdot 1,72a^2 \delta + f_2 n_p \cdot 0,16r_{\text{кр}}^2 a}, \quad (7)$$

где a , n_p , n_r – длина ребра, количество ребер и количество граней пентагонального додекаэдра соответственно; $f_2 = 1/3$ – коэффициент, учитывающий долю вклада каналов для одной элементарной ячейки (пузырька пены) [13, с. 1082]; $r_{\text{кр}}$ – радиус кривизны каналов Плато–Гиббса.

С учетом коэффициентов f_1 и f_2 :

$$K = \frac{7,66a^2}{10,5a\delta + 1,6r_{\text{кр}}^2}. \quad (8)$$

Здесь $10,5a\delta$ и $1,6r_{\text{кр}}^2$ соответствуют части жидкости, находящейся в пленках и каналах соответственно.

Когда распределение жидкости в пене отвечает условию для канальной модели $10,5a\delta \ll 1,6r_{кр}^2$, тогда

$$K = 4,8 \frac{a^2}{r_{кр}^2}. \quad (9)$$

Выразив длину ребра пентагонального додекаэдра через средний диаметр пузырька (принят диаметр шара с объемом, равным объему пентагонального додекаэдра, $a \approx 0,41d_{ср}$), можно представить (9) в виде

$$K = 0,8 \frac{d_{ср}^2}{r_{кр}^2} \approx 3 \frac{r_{ср}^2}{r_{кр}^2}. \quad (10)$$

Полиэдрическая модель хорошо отражает реальную структуру высокочастотной пены, но практически не подходит для исследования пен низкой кратности, для которых возможен большой диапазон изменений $r_{кр}$. Полиэдрическая структура пены детально изучена в [16–18], а ее обновленная версия представлена в [14; 15], где получила название фрактально-перколяционной модели. Такая модель позволяет учесть изменения структуры пены по высоте ее пенного столба. Однако данную модель не представляется возможным использовать для описания пен низкой кратности.

Наиболее близкой к структуре реальных пен низкой кратности является ячеистая модель [6, с. 35]. Ячеистая структура является промежуточной между сферической и полиэдрической пенами. Газовые пузырьки в данной модели имеют форму «смятых» шариков, причем эта форма может меняться от сферической до полиэдрической в зависимости от капиллярного разрежения. Однако ввиду сложности формы деформированного газового пузырька и, соответственно, всей пенной структуры пока не получено простых и достаточно точных зависимостей, описывающих вытекание жидкости из пен. Попытки рассчитать скорость синерезиса для ячеистой пены были предприняты в [11, с. 8], а также при проведении настоящих исследований.

В уравнении (10) радиус кривизны поперечного сечения поверхности канала Плато–Гиббса может меняться в очень широких пределах: от значений, соизмеримых с $d_{ср}$, до значений, близких к δ . Поэтому для ячеистой модели пены удобно перейти от параметра $r_{кр}$ к радиусу самого канала (капилляра) r_k , который можно представить в виде цилиндра постоянного поперечного сечения. Тогда (7) примет вид

$$K = \frac{7,66a^3}{f_1 n_T \cdot 1,72a^2\delta + f_2 n_p \pi r_k^2 a} = \frac{7,66a^2}{10,5a\delta + 31,4r_k^2}. \quad (11)$$

С учетом того, что $10,5a\delta \ll 31,4r_k^2$, а также заменив a через $d_{ср}$, выражение (11) представим следующим образом:

$$K = 4,1 \cdot 10^{-2} \frac{d_{ср}^2}{r_k^2}. \quad (12)$$

Уравнения (5) и (10) связывают кратность пены (K) с ее дисперсностью через $d_{ср}$ и $r_{кр}$ для полиэдрической модели пенной структуры и через δ – для пленочной. Уравнение (12) может применяться для ячеистой пены, где вместо параметра $r_{кр}$ используется r_k .

Так как пена начинает разрушаться с момента образования, то к моменту наступления гидростатического равновесия в ней распределение пузырьков по высоте пенного столба будет определяться характерным соотношением. Такое уравнение получено в ряде работ и имеет схожую структуру, отличающуюся коэффициентами, которые, в свою очередь, зависят от выбранной структурной модели пузырька пены [6, с. 94–99]:

$$K(z) = K(0) \left(\frac{\rho g r_{cp} z}{\sigma \sqrt{K(0)} \cdot \sqrt{C_k}} + 1 \right)^2, \quad (13)$$

где $K(0)$ – кратность пены на расстоянии $z=0$ от жидкой фазы; C_k – коэффициент полиэдричности; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

В работах других исследователей, например [19, с. 163; 20; 21], уравнение (13) аналогичное, но со своими значениями $K(0)$ и C_k . Исходя из полученной зависимости кратности от положения в слое пены по высоте (13), средний диаметр пузырька можно определить по формуле

$$d_{cp} = \frac{2\sigma\sqrt{C_k}\sqrt{K(0)}}{\rho g z} \left(\sqrt{\frac{K(z)}{K(0)}} - 1 \right). \quad (14)$$

Для анализа уравнения (14) получены значения d_{cp} для различных диапазонов $K(z)$ и z (табл. 1). При проведении численных расчетов приняты средние значения величин, характерных для реальных пен и растворов пенообразователей для их получения: $K(0) = 4$; $C_k = 0,33$; $\sigma = 0,022$ Н/м; $\rho = 103$ кг/м³, показатель смачивающей способности $\tau_{cm} = 4$ с, средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены $v_{cp} = 10$ м/с [6, с. 31].

Т а б л и ц а 1. Значения d_{cp} по формуле (14) для различных диапазонов значений z и $K(z)$
 Table 1. Values of the average diameter of the bubble (d_{cp}) according to formula (14) for different ranges of values of z and $K(z)$

Диапазоны значений z и $K(z)$, values Ranges of z and $K(z)$, values	Соответствующий диапазон значений d_{cp} , мм The corresponding range of d_{cp} values, mm
$z = 0,2-0,5$ м; $K(z = 0,2-0,5 \text{ м}) = 50-150$	0,01–0,07
$z = 0,05-0,2$ м; $K(z = 0,05-0,2 \text{ м}) = 10-50$	0,008–0,040
$z = 0,01-0,05$ м; $K(z = 0,01-0,05 \text{ м}) = 50-10$	0,007–0,030

Анализируя результаты расчетов d_{cp} по (14), можно сделать вывод, что абсолютные значения среднего диаметра пузырька, представленные в табл. 1, на несколько порядков отличаются от экспериментальных значений для реальных пен [6, с. 31]. Уравнение (14), предположительно, пригодно для пен высокой кратности. Так, для случая $z = 0,01$ м, если кратность будет достигать значений $K(z = 0,01 \text{ м}) = 4000$, то средний диаметр пузырька по (14) $d_{cp} = 1,55$ мм. Несмотря на это вопрос о получении зависимости для d_{cp} , которая удовлетворительно смогла бы описать результаты экспериментальных исследований для пен низкой кратности, остается актуальным.

Полуэмпирическая модель пен низкой кратности. Расчет объемной скорости истечения жидкости по капилляру (каналу) можно провести, используя уравнение Пуазейля [6, с. 83; 22, с. 38, 57] при установившемся режиме течения

$$Q_0 = \frac{\pi r_k^4 \Delta p}{8 \eta z}, \quad (15)$$

где r_k – радиус канала Плато–Гиббса длиной z ; Δp – давление, приводящее жидкость в движение.

Можно выразить Δp следующим выражением:

$$\Delta p = p_\Gamma - p_k, \quad (16)$$

где p_Γ – гидростатическое давление, способствующее стеканию жидкости, p_k – капиллярное давление, способствующее всасыванию жидкости вверх по капилляру. Считается, что капилляры вертикально расположены по всей высоте пенного столба, тогда

$$p_\Gamma = \rho g z, \quad (17)$$

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r_k}, \quad (18)$$

где θ – краевой угол смачивания.

Так как $p_k \ll p_\Gamma$, капиллярным давлением можно пренебречь и уравнение (15) примет вид

$$Q_0 = \frac{\pi r_k^4 \rho g}{8\eta}, \quad (19)$$

что согласуется с формулой (6) для линейной скорости течения.

Объемную скорость истечения жидкой фазы пены по каналам Плато–Гиббса можно выразить иным образом:

$$Q_c = Q_0 N, \quad (20)$$

где N – количество каналов Плато–Гиббса.

Если принять, что в горизонтальной плоскости пенного столба пузырьки имеют форму правильных шестиугольников (форма сечения пентагонального додекаэдра, как правило, в виде шестиугольника), стыки вершин которых являются сечениями каналов Плато–Гиббса, а диаметр такого пузырька – это диаметр круга площадью, равной площади шестиугольника, то количество каналов можно определить по формуле

$$N = \frac{8S_{м.е}}{\pi d_{ср}^2}, \quad (21)$$

где $S_{м.е}$ – площадь горизонтального сечения емкости с пеной.

В таком случае (20) с учетом (21) примет вид

$$Q_c = \frac{r_k^4 \rho g S_{м.е}}{\eta d_{ср}^2}. \quad (22)$$

Объемную скорость истечения жидкой фазы пены также можно выразить через устойчивость пены C (время выделения из пены 50 % жидкой фазы):

$$Q_c = \frac{V_{р-ра}}{2C}, \quad (23)$$

где $V_{р-ра}$ – объем раствора пенообразователя, из которого получена пена.

Выразив объем раствора пенообразователя через кратность пены в начальный момент времени ($t = 0$) и размеры емкости для пены, формула приобретает следующий вид:

$$Q_c = \frac{S_{м.е} \cdot z}{2KC}, \quad (24)$$

где K – кратность пены, равная отношению объема пены (емкости с пеной) к объему раствора пенообразователя, из которого она получена.

Преобразуя формулы (22) и (24), можно обозначить средний диаметр пузырька пены выражением

$$d_{ср} = \sqrt{\frac{2KCr_k^4 \rho g}{z\eta}}. \quad (25)$$

Согласно [5] устойчивость можно выразить следующим образом:

$$C = \frac{\sigma \tau_{см}}{\eta v_{ср}} K, \quad (26)$$

где $v_{ср}$ – средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены.

С учетом (26) выражение (25) примет вид

$$d_{cp} = \frac{Kr_k^2}{\eta} \sqrt{\frac{2\tau_{cm}\sigma\rho g}{zv_{cp}}}. \quad (27)$$

Согласно (12) средний радиус каналов Плато–Гиббса для ячеистой структуры пены можно определить по формуле

$$r_k = \frac{d_{cp}}{4,94\sqrt{K}}. \quad (28)$$

В итоге с учетом (28) средний диаметр пузырька в начальный момент времени вычислим по выражению

$$d_{cp} = 17,3\eta \sqrt{\frac{zv_{cp}}{\tau_{cm}\sigma\rho g}}. \quad (29)$$

Для анализа полученного уравнения построен график зависимости среднего диаметра пузырька d_{cp} от положения в слое пены по высоте z (рис. 2).

Таким образом, средний диаметр пузырька, а следовательно, и дисперсность пены можно оценить через свойства раствора пенообразователя, среднюю скорость струи при пенообразовании на поверхности и высоту столба полученной пены. В выражении (29) исключена кратность пены в явном виде, что хорошо согласуется с выражениями для d_{cp} при пенообразовании на поверхности, сетке и при барботаже [10], в которых также отсутствует кратность.

В отличие от теоретической модели (14) полуэмпирическая модель пены (29) позволяет оценить значения d_{cp} по высоте пенного столба (удовлетворительно описывает экспериментальные данные), а значит, и дисперсность пены в зависимости от физико-химических свойств раствора пенообразователя, из которого она получена.

Экспериментальные исследования дисперсности пенного столба и обсуждение результатов. Для проверки полученных зависимостей были спланированы и проведены экспериментальные исследования по определению дисперсности пен в лабораторных условиях. В качестве пенообразователя применялся «Синтек-6НС» (6 %, ТУ РБ 101114857.049-2004), придающий следующие характеристики раствору: $\rho = 1003,4 \text{ кг/м}^3$; $\sigma = 29,045 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$; $\eta = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ (Н·с)/м}^2$ и $\tau_{cm} = 3,2 \text{ с}$. Начальный объем жидкой фазы до момента генерирования пены составлял $V_0 = 82,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, средняя скорость струи водного раствора пенообразователя в момент генерирования пены – $v_{cp} = 10,7 \text{ м/с}$. В раствор пенообразователя был добавлен природный краситель, не влияющий на его свойства, для получения более контрастного изображения структуры пены. Фотографирование производилось через $120 \pm 20 \text{ с}$ после образования пены. В период проведения эксперимента было зафиксировано, что этого времени достаточно, чтобы из пены выделилось 50 % жидкой фазы. Важно отметить, что это значение хорошо коррелирует со временем разрушения 25 % объема пены (отличие не превысило 20 %), которое фиксировалось в экспериментальных работах [5; 23], где применялись растворы трех марок пенообразователей общего назначения, одной марки пенообразователя специального назначения и одной марки пенообразователя, применяемого для тушения пожаров в качестве смачивателя.

На рис. 3 представлена фотография пенного столба в цилиндрической мерной емкости объемом $V_{м.е} = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ и высотой $h_{м.е} = 0,28 \text{ м}$, сделанная через $120 \pm 20 \text{ с}$ после образования пены. Результаты экспериментальных исследований с другими пенообразователями, характеристики которых представлены в [5; 23], были идентичны представленным на рис. 3. На рисунке введены обозначения высот, которые поясняются в табл. 2 для двух моментов времени. В ходе исследования структуры пены по высоте было выделено пять зон: I – зона жидкой фазы, II – зона сферической пены, III – зона ячеистой пены, IV – зона полиэдрической пены, V – зона газовой фазы. Значения усредненной кратности пены для зон II–IV также представлены в табл. 2.

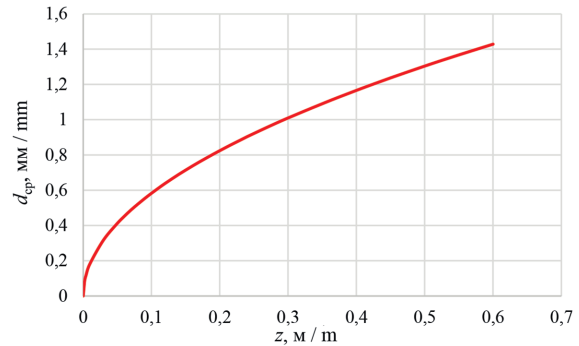


Рис. 2. Зависимость среднего диаметра пузырька (d_{cp}) от положения в слое пены по высоте (z) в соответствии с (29) в начальный момент времени ($t = 0$)

Fig. 2. The dependence of the average diameter of foam bubbles d_{cp} on the position in the foam layer by height z in accordance with (29) at the initial moment of time ($t = 0$)

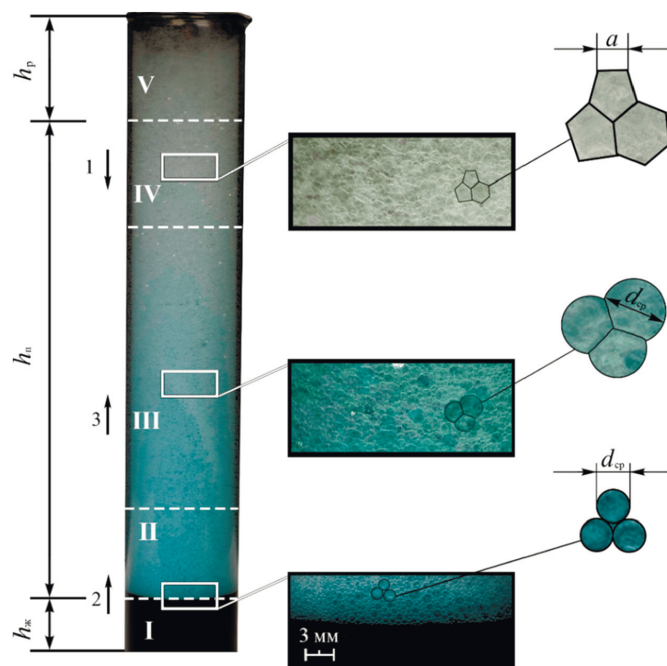


Рис. 3. Структура пенного столба через 120 ± 20 с; $h_{\text{ж}}$ – высота жидкой фазы; $h_{\text{п}}$ – высота пенного слоя; $h_{\text{р}}$ – высота разрушенного участка пены, a – длина ребра; I – зона жидкой фазы, II – зона сферической пены, III – зона ячеистой пены, IV – зона полиэдрической пены, V – зона газовой фазы. Стрелками обозначены направления протекания следующих процессов: 1 – дренаж (истечение жидкой фазы), 2 – капиллярное всасывание, 3 – диффузия газа

Fig. 3. The structure of the foam column after 120 ± 20 s; $h_{\text{ж}}$ is the height of the liquid phase, $h_{\text{п}}$ is the height of the foam layer, $h_{\text{р}}$ is the height of the destroyed foam section, a – rib length; I is the liquid phase zone, II is the spherical foam zone, III is the cellular foam zone, IV is the polyhedral foam zone, V is the gas phase zone. The arrows indicate the directions of the following processes 1 – drainage (outflow of the liquid phase), 2 – capillary suction, 3 – gas diffusion

Т а б л и ц а 2. Характеристики высотных зон сразу после образования пены и через промежуток времени $t = 120 \pm 20$ с

Table 2. Characteristics of altitude zones immediately after foam formation and after a time interval $t = 120 \pm 20$ s

Время Time	Параметры, характеризующие столб пены Parameters characterizing the foam column	Кратность, характерная для высотных зон Multiplicity typical for high-altitude zones	Диаметр пузырька, усредненный по высотным зонам Bubble diameter, averaged over altitude zones
$t = 0$ с	$h_{\text{ж}0} = h_{\text{ж}} / 2 = 14$ мм; $h_{\text{п}0} = h_{\text{макс}} = h_{\text{ж}} / 2 + h_{\text{п}} + h_{\text{р}} = 266$ мм; $h_{\text{р}0} = 0$	$K_0 = 9,5$	$d_{\text{ср}} = d_0 \approx 1$ мм
$t = 120 \pm 20$ с (рис. 3)	$h_{\text{ж}} = 28$ мм, $V_{\text{ж}} = 55 \cdot 10^{-6}$ м ³ ; $h_{\text{п}} = 210$ мм, $V_{\text{п}} = 412,5 \cdot 10^{-6}$ м ³ ; $h_{\text{р}} = 42$ мм, $V_{\text{р}} = 82,5 \cdot 10^{-6}$ м ³	$K_{\text{II}} = 4-10$; $K_{\text{срII}} = 7$; $K_{\text{III}} = 11-20$; $K_{\text{срIII}} = 15$; $K_{\text{IV}} = 21-200$; $K_{\text{срIV}} = 110$	$d_{\text{срII}} = 1,4$ мм $d_{\text{срIII}} = 2,2$ мм $d_{\text{срIV}} = 2,4$ мм

П р и м е ч а н и я. K_0 , d_0 – кратность пены и средний диаметр пузырьков в момент времени $t = 0$; $h_{\text{ж}0}$, $h_{\text{п}0}$, $h_{\text{р}0}$ – высота жидкой фазы, пены и разрушенного участка пены в момент времени $t = 0$; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{р}}$ – объем жидкой фазы, пены и разрушенного участка пены в момент времени $t = 120 \pm 20$ с.

Диапазоны значений кратности в зонах II–IV (K_{II} , K_{III} и K_{IV}) не рассчитывались, а оценивались визуально в зависимости от того, к какой классификационной группе их можно отнести ($K = 4-10$ – пена низкой кратности (мокрая), $K = 11-20$ – пена низкой кратности (сухая), $K = 21-200$ – пена средней кратности). Для расчета принимались средние значения из указанных диапазонов.

N o t e s. K_0 , d_0 is the multiplicity of foam and the average diameter of bubbles at time $t = 0$; $h_{\text{ж}0}$, $h_{\text{п}0}$, $h_{\text{р}0}$ is the height of the liquid phase, foam and the destroyed foam section at time $t = 0$; $V_{\text{ж}}$, $V_{\text{п}}$, $V_{\text{р}}$ is the volume of the liquid phase, foam and the destroyed foam section at time $t = 120 \pm 20$ s.

The ranges of multiplicity values in zones II–IV (K_{II} , K_{III} and K_{IV}) were not calculated, but evaluated visually, depending on which classification group they could be attributed to ($K = 4-10$ – low-multiplicity foam (wet), $K = 11-20$ – low-multiplicity foam (dry), $K = 21-200$ – foam of medium multiplicity). The average values from the specified ranges were used for the calculation.

Разделение на зоны I–V выполнено в зависимости от типа дисперсной системы. В зоне I находится жидкость, которая представляет собой раствор пенообразователя «Синтек-6НС» (6 %) в воде (жидкая фаза), а в зоне V – воздух (газовая фаза), который заполнил верхнюю часть открытой цилиндрической мерной емкости после разрушения некоторого объема пены. В зонах II–IV содержится пена, отличающаяся по высоте кратностью, размерами и формой пузырьков. Следует отметить, что на фотографии пенного столба зоны IV (пена) и V (воздух) слабо различимы. Это связано с тем, что после разрушения пузырьков на поверхности стекла мерной емкости остается их каркас (отпечаток), создающий иллюзию присутствия пены. При этом в ходе визуального осмотра (сверху и вблизи емкости) фиксировалось отсутствие пены в зоне V. Во время экспериментов стекло емкости не очищалось, так как любое внешнее вмешательство приводило к ускорению процесса разрушения пенного столба. По окончании каждого эксперимента емкость проходила стадии промывки и сушки. Разделение столба пены на зоны II, III и IV было основано, как уже было упомянуто, на форме пузырьков в них. Так, во II зоне пузырьки имели строго сферическую форму, в то время как в III зоне форма пузырьков напоминала смятые шарики (ячеистая пена), а в зоне IV четко прослеживалась многогранная (полиэдрическая) структура пузырьков (рис. 3, справа).

Сразу после образования пены, то есть в начальный момент времени, ее кратность составляла $K_0 = 9,5$, а неоднородная структура пузырьков была равномерно распределена по высоте всего пенного столба. Низко- и высокодисперсная пена случайным образом находилась как в верхней, так и в нижней частях мерной емкости, а средний диаметр пузырьков $d_{cp} = d_0$, определенный по методике, приведенной в [24], составлял около 1 мм. Затем в нижней части емкости постепенно стали формироваться пузырьки с мелким размерным составом ($d_{min} \leq d < d_{cp}$), а в верхней части – с крупным ($d_{cp} < d \leq d_{max}$). Это свидетельствует о том, что процессы обезвоживания (синерезис) пены, коалесценции (укрупнение пузырьков за счет разрушения разделяющих их пленок) и коволюции (укрупнение пузырьков за счет диффузии газа через разделяющие пленки) [6, с. 46] начались практически сразу после образования пены ($t = 0$). За время $t = 120 \pm 20$ с пузырьки пены распределились по высоте таким образом, что образовали зоны II, III и IV с характерными размерами и формой пузырьков, имеющие следующее процентное соотношение по объему: 19, 59 и 22 % соответственно. В системе наступило гидростатическое квазиравновесное состояние.

Средняя кратность пены через время $t = 120 \pm 20$ с может быть определена как

$$K_{cp} = \frac{V_{п}}{V_0 - V_{ж}} = \frac{412,5 \cdot 10^{-6}}{(82,5 - 55,0) \cdot 10^{-6}} = 15, \quad (30)$$

что согласуется со значениями характерной кратности для зон II–IV, указанными в табл. 2:

$$K_{cp} = \frac{V_{п}}{\left(\frac{V_{п}\omega_{II}}{K_{cpII}} + \frac{V_{п}\omega_{III}}{K_{cpIII}} + \frac{V_{п}\omega_{IV}}{K_{cpIV}} \right)} = \left(\frac{\omega_{II}}{K_{cpII}} + \frac{\omega_{III}}{K_{cpIII}} + \frac{\omega_{IV}}{K_{cpIV}} \right)^{-1} = \left(\frac{0,19}{7} + \frac{0,59}{15} + \frac{0,22}{110} \right)^{-1} = 14,6, \quad (31)$$

а средний диаметр пузырька пены:

$$d_{cp} = \frac{d_{cpII}N_{II} + d_{cpIII}N_{III} + d_{cpIV}N_{IV}}{N_{II} + N_{III} + N_{IV}} = \left(\frac{\omega_{II}}{d_{cpII}^2} + \frac{\omega_{III}}{d_{cpIII}^2} + \frac{\omega_{IV}}{d_{cpIV}^2} \right) \cdot \left(\frac{\omega_{II}}{d_{cpII}^3} + \frac{\omega_{III}}{d_{cpIII}^3} + \frac{\omega_{IV}}{d_{cpIV}^3} \right)^{-1} = 1,83 \text{ мм}, \quad (32)$$

где ω_{II} – ω_{IV} – соотношение между зонами II–IV по объему в долях; N_{II} – N_{IV} – количество пузырьков в соответствующей зоне, определяемое как отношения объема зоны к объему пузырька.

Динамику изменения высоты пенного столба можно представить в виде графика (рис. 4). Впервые подобный график был получен в Институте коллоидов и поверхностей Макса Планка, обсуждение этого графика представлено в [25]. Последние достижения в данной области (например,

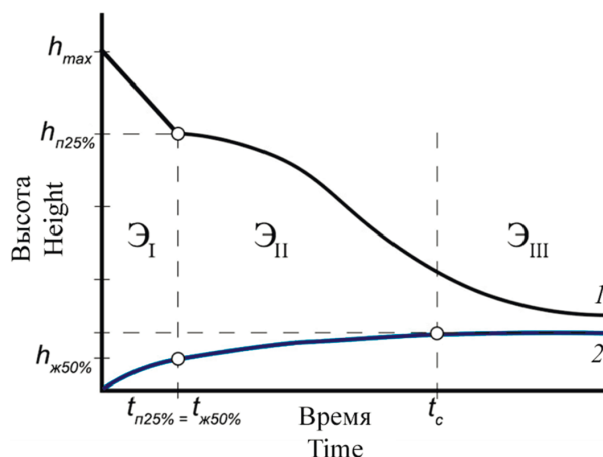


Рис. 4. Изменение высоты слоев пены и жидкости с течением времени (ось абсцисс совмещена с высотой столба жидкости $h_{ж0}$ в момент времени $t = 0$). Э_I и Э_{II} – этапы быстрого и медленного истечения жидкой фазы; Э_{III} – этап разрушения пены без выделения жидкости; $h_{ж50\%}$ – высота столба жидкости после выделения 50 % жидкой фазы из пенного слоя; $h_{n25\%}$ – высота столба пены после разрушения 25 % объема; h_{max} – максимальная высота пенного столба; $t_{ж50\%}$ – время выделения 50 % жидкой фазы из пенного слоя; $t_{n25\%}$ – время разрушения 25 % объема пены; t_c – время, после которого пена разрушается без выделения жидкости; кривая 1 показывает изменение высоты пенного слоя, кривая 2 – изменение уровня жидкости

Fig. 4. Change in the height of foam and liquid layers over time (X-axis is aligned with the height of the liquid phase column $h_{ж0}$ at $t = 0$). Э_I and Э_{II} are the stages of rapid and slow liquid phase release; Э_{III} is the stage of foam destruction without liquid; $h_{ж50\%}$ is the height of the liquid column after release of 50 % of the liquid phase from the foam layer; $h_{n25\%}$ is the height of foam column after destruction of 25 % of its volume; h_{max} is the maximum height of foam column; $t_{ж50\%}$ is the time of release of 50 % of the liquid phase from the foam layer; $t_{n25\%}$ is the time of destruction of 25 % of foam volume; t_c is the time after which the foam destructs without releasing liquid; curve 1 shows a change in the height of the foam layer, curve 2 shows a change in the liquid level

[26]) хорошо согласуются с результатами описанных нами экспериментов. На графике, представленном на рис. 4, в отличие от работы [25], имеется точка перегиба, по которой процесс синерезиса можно разделить на два этапа: быстрого (Э_I) и медленного (Э_{II}) истечения жидкой фазы. Кроме того, можно выделить этап III – разрушение пены без выделения жидкости (Э_{III}).

Закключение. В результате анализа экспериментальных данных, представленных в данной работе, установлено, что структура пены зависит от положения в слое пены по высоте: снизу располагаются пузырьки сферической формы, в центре форма пузырьков имеет ячеистый вид, а сверху находятся полиэдрические пузырьки. Наибольший объем занимает пена с пузырьками ячеистой формы – до 60 % от общего объема пенного столба. Предложенная для расчета среднего диаметра пузырька пен низкой кратности формула (29) хорошо согласуется с результатами экспериментов. Средний диаметр пузырька, а значит, и дисперсность пены зависят от характеристик раствора пенообразователя, а также от положения в слое пены по высоте.

Знание среднего диаметра пузырьков в слое пены критически важно в ряде промышленных и технологических процессов, где размер пузырьков напрямую влияет на эффективность процесса и качество конечного продукта: горно-обогатительная промышленность, производство пищевых продуктов, очистка газов и жидкостей, химическая и нефтяная промышленность, пожаротушение. В последнем случае (пожаротушение) размер пузырьков определяет кратность и устойчивость пены, что влияет на ее огнетушащую эффективность. Например, пена с мелкими пузырьками лучше растекается по поверхности и перекрывает доступ кислорода при тушении горючих жидкостей, а пена высокой кратности с более крупными пузырьками заполняет большие объемы закрытых помещений.

Таким образом, контроль и знание диаметра пузырьков позволяют управлять физическими свойствами пены, такими как вязкость, плотность, устойчивость и эффективность взаимодействия с другими фазами, что критично для достижения целевых показателей при пожаротушении.

Список использованных источников

1. Шароварников, А. Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав, свойства, применение / А. Ф. Шароварников, С. А. Шароварников. – М.: Пожнаука, 2005. – 335 с.
2. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 1 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 10. – С. 22–26.
3. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 2 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 2–5.
4. Камлюк, А. Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин. – Мн.: Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси, 2019. – 224 с.
5. Камлюк, А. Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
6. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен: монография / К. Б. Канн. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1983. – 167 с.
7. Манжай, В. Н. Дисперсность и устойчивость пены, полученной из раствора поливинилового спирта, и свойства сформированных пенокриогелей / В. Н. Манжай, М. С. Фуфаева // Коллоидный журнал. – 2014. – Т. 76, № 4. – С. 495–499. <https://doi.org/https://doi.org/10.7868/S0023291214040090>
8. Оценка эффективности механических методов разрушения пен / А. Н. Пахомов, Д. С. Пекшев, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова // Вестник ТГТУ. – 2024. – Т. 30, № 2. – С. 292–299.
9. Пенная склеротерапия: история развития и современные данные / А. А. Бешко, С. Н. Тихон, Е. В. Крыжова [и др.] // Новости хирургии. – 2012. – Т. 20, № 4. – С. 101–110.
10. Камлюк, А. Н. Подходы к расчету кратности, дисперсности и устойчивости воздушно-механических пен низкой кратности / А. Н. Камлюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 54–65. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54>
11. Ветошкин, А. Г. Физические основы и техника процессов сепарации пены / А. Г. Ветошкин. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 404 с.
12. Баштовой, В. Г. Специальные течения жидкостей и газов / В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс. – Мн.: БНТУ, 2020. – 45 с.
13. Кротов, В. В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. Локальная кратность полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 6. – С. 1081–1091.
14. Пахаруков, Ю. В. Фрактально-перколяционная модель устойчивости пены / Ю. В. Пахаруков, Т. Е. Шевнина // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1999. – Т. 69, вып. 12. – С. 900–903.
15. Пахаруков, Ю. В. Стабилизация пены поверхностно-активными веществами во фрактально-перколяционной модели разрушения / Ю. В. Пахаруков, Т. Е. Шевнина // Письма в Журнал технической физики. – 2001. – Т. 27, вып. 3. – С. 85–88.
16. Кротов, В. В. Теория синерезиса пен и концентрированных эмульсий. Локальная гидропроводимость полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. 42, № 6. – С. 1092–1101.
17. Кузнецова, Л. Л. Исследование закономерностей течения растворов ПАВ по каналам Плато – Гиббса пены / Л. Л. Кузнецова, П. М. Кругляков // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 260, вып. 4. – С. 928–932.
18. Кротов, В. В. Структура, синерезис и кинетика разрушения полиэдрических дисперсных систем / В. В. Кротов // Вопросы термодинамики гетерогенных систем и теории поверхностных явлений: сб. науч. ст. / Ленинград. ун-т им. А. А. Жданова; под ред. А. В. Сторонкина. – Ленинград, 1982. – Вып. 6. – С. 110–191.
19. Кругляков, П. М. Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Р. Ексерова. – М.: Химия, 1990. – 432 с.
20. Капиллярные эффекты и гидростатическая устойчивость пен / А. В. Перцов, В. Н. Чернин, Б. Е. Чистяков, Е. Д. Щукин // Доклады Академии наук СССР. – 1978. – Т. 238, вып. 6. – С. 1395–1398.
21. Канн, К. Б. Некоторые закономерности синерезиса пен. Вытекание / К. Б. Канн // Коллоидный журнал. – 1978. – Т. 40, № 5. – С. 858–864.
22. Вилкова, Н. Г. Свойства пен и методы их исследования: монография / Н. Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
23. Говор, Э. Г. Исследование ключевых классификационных характеристик пены и влияния на них параметров розеточного оросителя / Э. Г. Говор, А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов // Вестник Фонда фундаментальных исследований. – 2024. – № 1 (107). – С. 86–96.
24. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, А. Ф. Титовец [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>
25. Шаповалова, Е. А. Экспериментальные исследования по подбору оптимальных концентраций ПАВ в водных растворах с целью повышения производительности газовых скважин / Е. А. Шаповалова, В. А. Огай // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – Вып. 1. – С. 373–387. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-373-387>
26. Probing foams from the nanometer to the millimeter scale by coupling small-angle neutron scattering, imaging, and electrical conductivity measurements / J. Lamolinarie, B. Dollet, J.-L. Bridot [et al.] // Soft Matter. – 2022. – Vol. 18, iss. 46. – P. 8733–8747. <https://doi.org/10.1039/d2sm01252a>

References

1. Sharovarnikov A. F., Sharovarnikov A. F. *Foaming Agents and Foams for Extinguishing Fires. Composition, Properties, Application*. Moscow, Pozhnauka Publ., 2005. 335 p. (in Russian).
2. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V.A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 1. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 10, pp. 22–26 (in Russian).
3. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V.A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 2. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 11, pp. 2–5 (in Russian).
4. Kamluk A. N., Grachulin A. V. *Compression Foam for the Needs of Fire Brigades*. Minsk, University of Civil Protection, 2019. 224 p. (in Russian).
5. Kamluk A. N., Likhomanov A. O., Govor E. G. Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 194–205 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
6. Kann K. B. *Capillary Hydrodynamics of Foam*. Novosibirsk, Nauka, Siberian Branch Publ., 1983. 167 p. (in Russian).
7. Manzhay V. N., Fufayeva M. S. Dispersity and stability of foams obtained from poly(vinyl alcohol) solution and the properties of resulting foamed cryogels. *Colloid Journal*, 2014, vol. 76, no. 4, pp. 455–458. <https://doi.org/10.1134/s1061933x14040097>
8. Pakhomov A. N., Pekshev D. S., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V. Evaluation of the effectiveness of mechanical methods of foam destruction. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 292–299 (in Russian).
9. Baeshko A. A., Tikhon S. N., Kryzhova E. V., Markautsan P. V., Vartanyan V. F., Dechko V. M., Kovalevich K. M., Shestak N. G. Foam-form sclerotherapy: history of the development and present-day findings. *Novosti Khirurgii*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 101–110 (in Russian).
10. Kamlyuk A. N. Approaches to calculating the expansion, dispersion and stability of low expansion air-mechanical foams. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 54–65 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2025.9-1.54>
11. Vetoshkin A. G. *Physical Basis and Technique of Foam Separation Processes*. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2016. 404 p. (in Russian).
12. Bashtovoy V. G., Reks A. G. *Special Flows of Liquids and Gases*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2020. 45 p. (in Russian).
13. Krotov V. V. Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. Local multiplicity of poly-hedral disperse systems. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 1081–1091 (in Russian).
14. Pakharukov Yu. V., Shevnina T. E. Fractal-percolation model of the stability of foam. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1999, vol. 69, iss. 12, pp. 954–958. <https://doi.org/10.1134/1.568119>
15. Pakharukov Yu. V., Shevnina T. E. Foam stabilization by surfactants: A fractal-percolation fracture model. *Technical Physics Letters*, 2001, vol. 27, pp. 127–128. <https://doi.org/10.1134/1.1352769>
16. Krotov V. V. Syneresis theory of foams and concentrated emulsions. Local hydroconductivity of poly-hedral disperse systems. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1980, vol. 42, no. 6, pp. 1092–1101 (in Russian).
17. Kuznetsova L. L., Kruglyakov P. M. Investigation of the flow patterns of surfactant solutions through Plateau–Gibbs foam channels. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1981, vol. 260, no. 4, pp. 928–932 (in Russian).
18. Krotov V. V. Structure, syneresis and destruction kinetics of polyhedral disperse systems. Storonskin A. V. (ed.). *Voprosy termodinamiki geterogennykh sistem i teorii poverkhnostnykh yavlenii: sbornik nauchnykh statsei* [Problems of Thermodynamics of Heterogeneous Systems and Theory of Surface Phenomena: Collection of Scientific Articles]. Leningrad, A. A. Zhdanov Leningrad University Publ., 1982, iss. 6, pp. 110–191 (in Russian).
19. Kruglyakov P. M., Yekserova D. R. *Foam and Foam Films*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 432 p. (in Russian).
20. Pertsov A. V., Chernin V. N., Chistyakov B. E., Shchukin E. D. Capillary effects and hydrostatic stability of foams. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1978, vol. 238, no. 6, pp. 1395–1398 (in Russian).
21. Kann K. B. Some patterns of pen syneresis. Leakage. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 1978, vol. 40, no. 5, pp. 858–864 (in Russian).
22. Vilkova N. G. *Properties of Foams and Methods of Their Investigation*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013. 120 p. (in Russian).
23. Govor E. G., Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O. Experimental study of main classification characteristics of foam and the influence of deflector type sprinkler parameters on them. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Vestnik of the Foundation for Fundamental Research*, 2024, vol. 107, no. 1, pp. 86–96 (in Russian).
24. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Titovets A. F., Polochanin N. S., Grachulin A. V. Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle of the foam-generating device on the foam dispersion. *Vestnik Universiteta grazhdanskoi zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 441–450 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>
25. Shapovalova E. A., Ogai V. A. Experimental studies on the selection of optimal surfactant concentrations in aqueous solutions to improve gas well productivity. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*, 2022, iss. 1, pp. 373–387 (in Russian). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2022-1-1-373-387>
26. Lamolinarie J., Dollet B., Bridot J.-L., Bauduin P., Diat O., Chiappisi L. Probing foams from the nanometer to the millimeter scale by coupling small-angle neutron scattering, imaging, and electrical conductivity measurements. *Soft Matter*, 2022, vol. 18, iss. 46, pp. 8733–8747. <https://doi.org/10.1039/d2sm01252a>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-141-148>
УДК 66.047.7



Оригинальная статья

А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков*

*Витебский государственный технологический университет,
Московский пр., 72, 210038, Витебск, Республика Беларусь*

**КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ТОНКИХ ВЛАЖНЫХ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Изложен метод расчета процесса сушки тонких плоских материалов на основе уравнения кинетики сушки, устанавливающий связь между величинами, определяющими теплообмен по коэффициенту теплоотдачи и влагообмен по относительной скорости сушки. На основе уравнения кинетики сушки по данным влагообмена полностью описывается процесс теплообмена. Рассмотрен экспериментальный метод расчета температуры материала в период падающей скорости сушки для пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока. Дана зависимость относительной скорости сушки от относительного влагосодержания и экспериментальный метод расчета коэффициента теплоотдачи для периода падающей скорости сушки. Предложен способ определения скорости сушки в периоды постоянной скорости и относительной скорости сушки. Представлены уравнения для расчета интенсивности сушки и плотности тепловых потоков. Дано сопоставление расчетных значений параметров сушки по полученным формулам с экспериментальными для сушки керамики, асбеста и войлока. Методы обработки опытных данных и полученные формулы имеют практическое значение для расчета кинетики сушки различных влажных материалов.

Ключевые слова: кинетика сушки, коэффициент теплоотдачи, относительная скорость сушки, относительное влагосодержание, температура

Благодарности: авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории теплофизических измерений Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси за помощь в проведении исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета, <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Котов Алексей Анатольевич* – ассистент кафедры «Теплоэнергетика» Витебского государственного технологического университета, e-mail: tm@vstu.by; *Кузьменков Сергей Михайлович* – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Витебского государственного технологического университета, e-mail: tm@vstu.by

Вклад авторов: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – сбор и анализ литературных данных, вывод зависимостей, проведение вычислений, написание текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Котов Алексей Анатольевич* – работа с графическим материалом, оформление, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Кузьменков Сергей Михайлович* – редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Конвективная сушка тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 141–148. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-141-148>

Поступила в редакцию: 27.08.2024

Доработанный вариант: 05.09.2025, 31.03.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Anatoly I. Ol'shanskii, Alexej A. Kotow, Sergey M. Kuzmenkov*

Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus

CONVECTIVE DRYING OF THIN WET HEAT-INSULATION MATERIALS

Abstract. The method of calculation of the drying process of thin flat materials on the basis of the equation of drying kinetics, which establishes the relationship between the values determining the heat exchange by the heat transfer coefficient and moisture exchange by the relative drying rate, is presented. On the basis of the drying kinetics equation, the heat

exchange process is fully described by moisture exchange data. An experimental method for calculating the material temperature during the period of falling drying rate for drying porous ceramics, sheet asbestos and woollen felt is considered. The dependence of relative drying rate on relative moisture content and an experimental method for calculating the heat transfer coefficient for the period of falling drying rate are given. A method for determining the drying rate from the value of drying rate during the period of constant rate and relative drying rate is proposed. Equations for calculating drying intensity and heat flux density are presented. Comparison of calculated values of drying parameters according to the obtained formulas with experimental ones for drying of ceramics, asbestos and felt is given. Experimental data processing methods and formulas obtained are of practical importance for calculating the kinetics of drying various wet materials.

Keywords: drying kinetics, heat transfer coefficient, relative drying rate, relative moisture content, temperature

Acknowledgments: the authors would like to thank the staff of the Laboratory of Thermophysical Measurements at the A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus for their assistance in conducting the study.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University, <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Alexej A. Kotow* – Assistant of the Department of Heat Power Engineering at Vitebsk State Technological University, e-mail: tm@vstu.by; *Sergey M. Kuzmenkov* – Assistant of the Department of Mechanical Engineering at Vitebsk State Technological University, e-mail: tm@vstu.by

Contribution of the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – collection and analysis of literature data, derivation of dependencies, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; *Alexej A. Kotow* – work with graphic material, design, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; *Sergey M. Kuzmenkov* – translation, editing of the text of the manuscript, discussion of results and conclusions.

For citation: Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. Convective drying of thin wet heat-insulation materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 141–148 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-141-148>

Received: 27.08.2024

Modified: 05.09.2025, 31.03.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Температура материала в процессе сушки является важнейшим параметром, отвечающим за качество готового продукта. Для описания кинетики сушки необходимо знать изменение среднеинтегральных характеристик влажного материала – влагосодержания и температуры с течением времени. Изменения средних значений влагосодержания и температуры определяются закономерностями взаимодействия поверхности влажного тела с окружающей средой [1; 2]. Сушка тонких капиллярно-пористых материалов протекает в условиях внешней задачи, когда скорость процесса слабо зависит от внутреннего сопротивления переносу и определяется только условиями внешнего теплового взаимодействия поверхности испарения материала с окружающей средой [1–9].

Для определения температуры в периоде падающей скорости сушки необходимо знать зависимость между влагосодержанием влажного тела и временем сушки [2; 4; 7–9], которую можно получить решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Однако решение такой задачи оказывается очень сложным в аналитическом отношении, поскольку коэффициенты теплообмена зависят от влагосодержания и температуры [2; 4; 6; 10; 11]. Поэтому для практического использования метода сушки представляют интерес экспериментальные, приближенные, достаточно простые и надежные уравнения, содержащие минимальное число постоянных, определяемых опытным путем [3; 8; 9; 11].

С этой целью были проведены экспериментальные исследования сушки подготовленных образцов тонких капиллярно-пористых материалов – пористой керамики, листового асбеста и строительного шерстяного войлока. Опыты проводились на конвективной сушильной установке с вынужденным движением теплоносителя (воздуха) в лаборатории теплофизических измерений Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Установка позволяла регулировать заданный температурный режим в сушильной камере. Режимы сушки керамики, асбеста и войлока выбраны в соответствии с условиями сушки этих материалов в промышленности.

Цель исследования – используя уравнения кинетики сушки и результаты обработки опытных данных, получить приближенные простые уравнения для расчета основных кинетических характеристик сушки керамики, асбеста и войлока.

Материалы для исследования. Особенности процесса сушки тонких материалов, имеющих большую удельную поверхность, проявляются по характеру изменения влагосодержания ($\bar{u}$) и температуры ($\bar{t}$) с течением времени (τ). Для проведения исследования были подготовлены образцы материалов в виде пластин со следующими размерами: пористая керамика – $120 \times 80 \times 5$ мм, листовой асбест – $120 \times 80 \times 6$ мм и шерстяной войлок – $120 \times 80 \times 8$ мм.

На рис. 1 представлены кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\tau)$ для сушки листового асбеста при следующем режиме: температура сушки $t_c = 120$ °С, скорость воздуха в сушильной камере $v = 5$ м/с.

При температурах $t = 90 \div 120$ °С сушка протекает при «мягких» режимах. Прогрев тонкого материала проходит за малый промежуток времени, а температура материала быстро повышается от начальной (t_0) до температуры мокрого термометра (t_m), практически равной температуре на поверхности материала (t_n). После стадии прогрева влагосодержание ($\bar{u}_{np}$) уменьшается по линейному закону до гигроскопического ($\bar{u}_{кр}$). Скорость сушки в этом периоде $d\bar{u}/d\tau = N$, величина постоянная – период постоянной скорости сушки (первый период сушки). Период постоянной скорости сушки является также и периодом постоянной температуры на уровне t_m .

При уменьшении влагосодержания $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается период падающей скорости сушки (второй период) с непрерывным повышением температуры до температуры среды (t_c) при времени сушки $\tau \rightarrow \infty$ (см. рис. 1). Тонкие материалы с большой удельной поверхностью при «мягких» режимах сушки имеют незначительные перепады влагосодержания и градиентов температуры по сечению влажного тела [1–8].

Основное уравнение кинетики сушки [1–6] запишем в виде

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_m} = N^* (1 + Rb), \quad (1)$$

где q_I, q_{II} – плотности потока теплоты в первом и втором периодах сушки; $\bar{\alpha}, \bar{\alpha}_{кр}$ – коэффициенты теплоотдачи в первом и втором периодах сушки; Rb – число Ребиндера; N^* – относительная скорость сушки, определяемая по выражению

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|,$$

где N – скорость сушки в первом периоде.

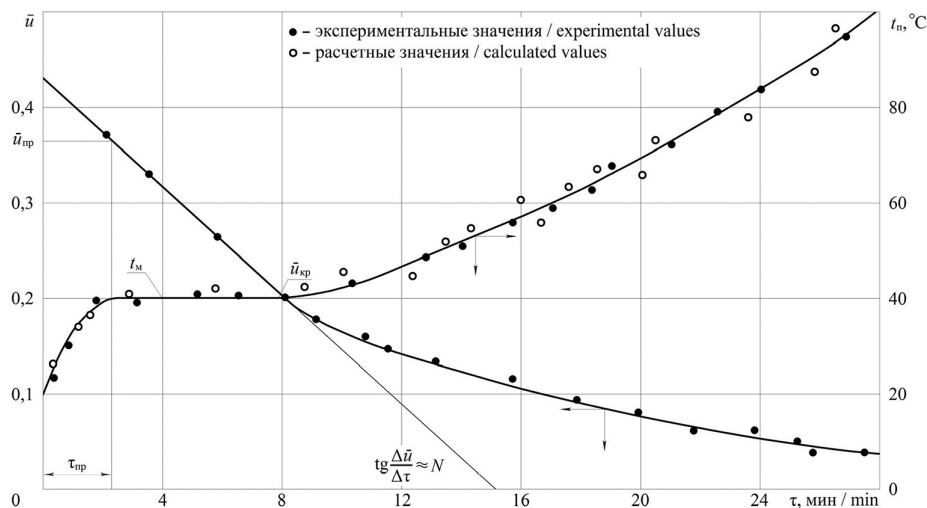


Рис. 1. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе сушки асбестовой пластины для режима сушки: температура $t_c = 120$ °С, скорость воздуха $v = 5$ м/с; $\bar{u}$ – изменение влагосодержания в течение времени τ , $\bar{u}_{np}$ – влагосодержание после прогрева, $\bar{u}_{кр}$ – гигроскопическое влагосодержание, t_m – температура мокрого термометра, t_{np} – время прогрева, N – скорость сушки в первом периоде

Fig. 1. Drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curve $\bar{t} = f(\tau)$ in the drying process of asbestos plate for drying mode: temperature $t_c = 120$ °С, air speed $v = 5$ m/s; $\bar{u}$ – change in moisture content over time τ , $\bar{u}_{np}$ – moisture content after heating, $\bar{u}_{кр}$ – hygroscopic moisture content, t_m – wet-bulb temperature, t_{np} – heating time, N – drying rate in the first period

При температуре материала $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ теплота парообразования $r \approx 2250\text{ кДж/кг}$, а удельная теплоемкость сухих материалов $c_0 \approx 0,8 \div 1,3\text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$. Следовательно, расход тепла на нагрев влажного тела в процессе сушки от общего количества тепла составляет 4 %. Таким образом, практически вся теплота идет на испарение влаги из материала.

Пренебрегая величиной числа Rb при малых его значениях, уравнение (1) запишем следующим образом:

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} \approx N^*, \quad (2)$$

где $\Delta t_I, \Delta t_{II}$ – разности температур в первом и втором периодах сушки.

Экспериментально установлено, что коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ является величиной постоянной только в периоде постоянной скорости сушки [1–6]. В периоде падающей скорости он непрерывно уменьшается, приближаясь к величине $\bar{\alpha}$ для сухого тела. П. Д. Лебедевым было предложено учитывать это уменьшение эмпирической формулой [1–9; 12]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n, \quad (3)$$

где показатель степени n не зависит от режима сушки и для каждого материала определяется экспериментально.

Для расчета коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ необходимы экспериментальные кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$, кривые скорости сушки $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ [8; 9; 12–14].

Постоянная n определяется из зависимости (3) по формуле

$$n \approx \frac{\lg \bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}}{\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены кривые скорости сушки $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ для сушки листового асбеста (а) и пористой керамики (б) для температуры сушки $t_c = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости воздуха $v = 3; 5$ и 10 м/с .

Результаты обработки опытных данных по уравнению (3) для сушки асбеста, войлока и керамики в температурном интервале $t_c = 90 \div 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости воздуха $v = 3; 5$ и 10 м/с показаны на рис. 3.

Из зависимости (4) по вычисленным значениям коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ были получены следующие величины показателя степени n : для листового асбеста $n \approx 0,71$, для войлока $n \approx 0,68$, для керамики $n \approx 0,73$. Чтобы унифицировать и упростить расчеты по сушке керамики, асбеста и войлока, примем среднее значение $n \approx 0,70$.

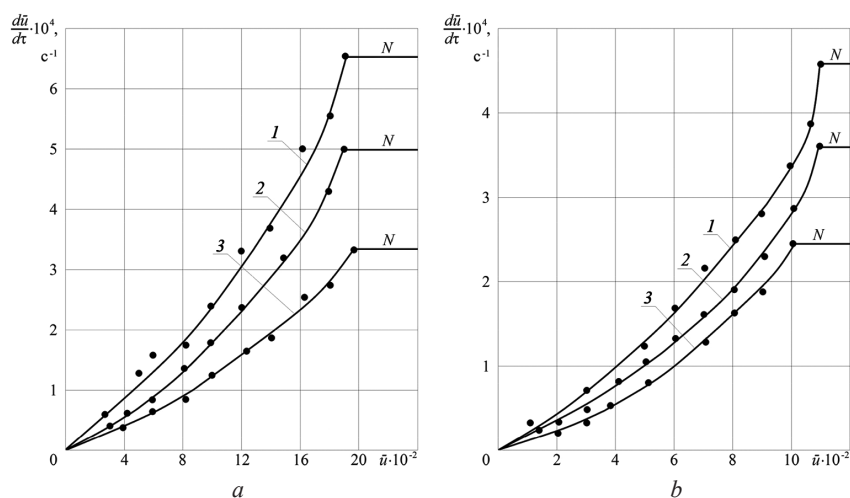


Рис. 2. Кривые скорости сушки для процессов сушки листового асбеста (а) и пористой керамики (б) для сушки $t_c = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости воздуха: 1 – 3 м/с; 2 – 5 м/с; 3 – 10 м/с

Fig. 2. Drying rate curves for drying processes of sheet asbestos (a) and porous ceramics (b) for drying temperature $t_c = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ at air velocity: 1 – 3 m/s; 2 – 5 m/s; 3 – 10 m/s

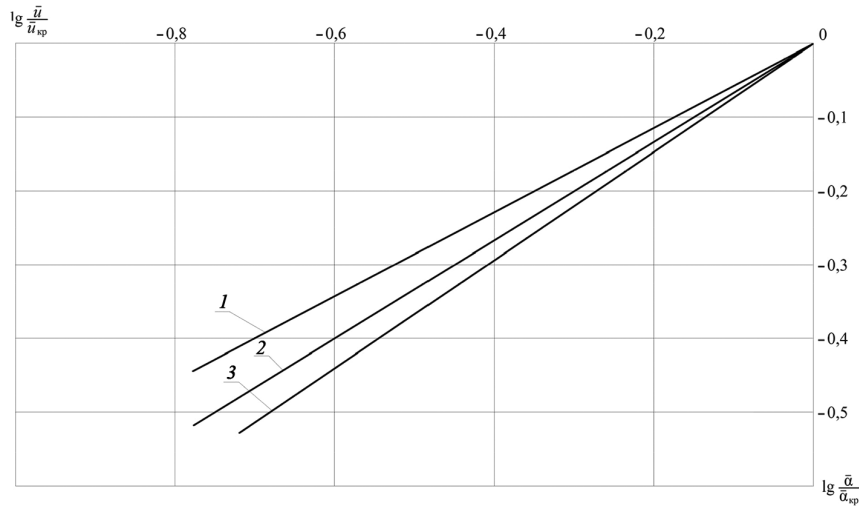


Рис. 3. Графики зависимости $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$ от $\lg \bar{a}/\bar{a}_{кр}$ для сушки асбеста (1), войлока (2) и пористой керамики (3)

Fig. 3. Graphs of dependence of $\lg \bar{u}/\bar{u}_{кр}$ on $\lg \bar{a}/\bar{a}_{кр}$ for drying of asbestos (1), felt (2) and porous ceramics (3)

Коэффициент теплоотдачи $\bar{a}$ определяется из уравнений теплового баланса для периодов постоянной и падающей скорости сушки

$$q_I \approx \bar{a}_{кр} \cdot (t_c - t_m) \approx j_I \cdot r, \quad (5)$$

$$q_{II} \approx \bar{a} \cdot (t_c - t_n) \approx j_{II} \cdot r, \quad (6)$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг, j_I и j_{II} – интенсивность испарения влаги соответственно в первом и втором периодах сушки, кг/(м²·с),

$$j_I \approx \rho \cdot R_V \cdot N, \quad (7)$$

$$j_{II} \approx \rho \cdot R_V \cdot (d\bar{u}/d\tau)_{II}, \quad (8)$$

где ρ – плотности материала, кг/м³, R_V – отношение объема тела к площади его поверхности, м.

Скорость сушки во втором периоде $(d\bar{u}/d\tau)_{II}$ определяется по экспериментальным данным (см. например, кривые скорости сушки для листового асбеста и пористой керамики на рис. 2).

Коэффициент теплоотдачи $\bar{a}$ (Вт / (м²·°C)) для первого и второго периодов сушки определяется следующим образом:

$$\bar{a}_{кр} \approx \frac{j_I \cdot r}{t_c - t_m} \approx \frac{\rho \cdot R_V \cdot N \cdot r}{t_c - t_m}, \quad (9)$$

$$\bar{a} \approx \frac{j_{II} \cdot r}{t_c - t_n} \approx \frac{\rho \cdot R_V \cdot r \cdot (d\bar{u}/d\tau)_{II}}{t_c - t_n}. \quad (10)$$

Исходя из выражения (3), запишем выражение (2) в виде:

$$\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} \approx N^*. \quad (11)$$

С учетом того, что $\Delta t_{II} = (t_c - t_n)$, $\Delta t_I = (t_c - t_m)$, получим

$$T^* = \frac{t_c - t_n}{t_c - t_m} \approx \frac{N^*}{\left(\bar{u}/\bar{u}_{кр} \right)^n}. \quad (12)$$

На рис. 4 даны результаты обработки эксперимента для зависимости $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки керамики, асбеста и войлока.

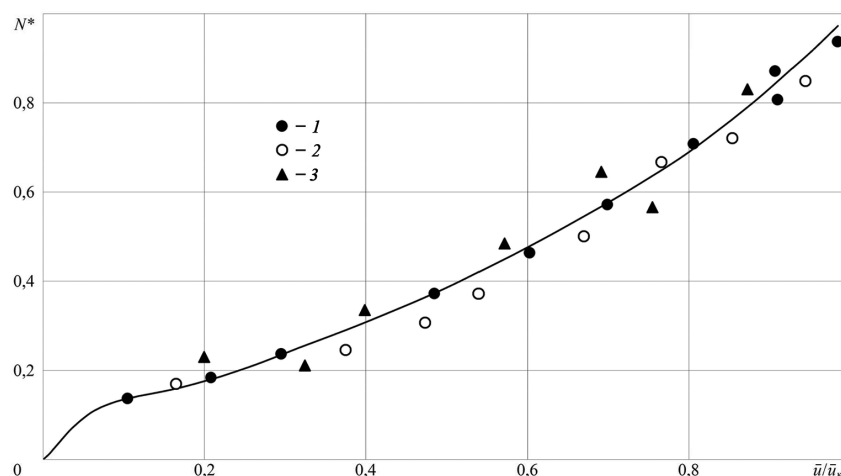


Рис. 4. Зависимость относительной скорости сушки N^* от относительного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ для сушки керамики (1), листового асбеста (2) и шерстяного войлока (3)

Fig. 4. The dependence of the relative drying rate N^* on the relative moisture content $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ for drying ceramics (1), asbestos sheets (2) and wool felt (3)

Кривая на рис. 4 приближенно аппроксимируется уравнением

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,3}. \quad (13)$$

Подставляя формулу (13) в (12) и принимая среднее значение $n = 0,70$, получим уравнение температурной кривой

$$t_{п} = t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,57}. \quad (14)$$

В результате обработки результатов экспериментов по сушке различных влажных материалов при разных режимах сушки были получены обобщенные зависимости, единые для всех исследованных материалов [12; 13; 15; 16]:

$$\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n = N^{*0,57}; \quad (15)$$

$$T^* = \frac{t_c - t_{п}}{t_c - t_m} \approx N^{*0,43}. \quad (16)$$

Из выражения (16) определяется температура на поверхности материала

$$t_{п} \approx t_c - N^{*0,43} \cdot (t_c - t_m). \quad (17)$$

Принимая в уравнении (15) среднее значение $n = 0,70$, получим

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,28}. \quad (18)$$

Несовпадение показателя степени n в формулах (13) и (18) составляет 6 %, что находится в допустимой зоне ошибки при обработке экспериментальных данных.

Подставляя в формулу (16) уравнение (18), получим выражение температурной кривой

$$t_{п} \approx t_c - (t_c - t_m) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,55}. \quad (19)$$

Исходя уравнения кинетики сушки плотность потока тепла в периоде падающей скорости сушки равна

$$q_{II} \approx \rho \cdot R_V \cdot r \cdot N \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,3}; \quad Rb \approx 0. \quad (20)$$

Сопоставление расчетных значений параметров кинетики сушки, вычисленных по формулам, с экспериментальными значениями, полученными в процессе конвективной сушки пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока, дано в таблице.

Сопоставление расчетных значений параметров кинетики сушки, вычисленных по формулам, с экспериментальными значениями в процессе конвективной сушки пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока

Comparison of calculated values of drying kinetics parameters calculated by formulas with experimental values in the process of convective drying of porous ceramics, sheet asbestos and woollen felt

$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	N^* (13)	τ , мин / min	$t_{п}$, °C	$t_{п}$, °C (14)	$t_{п}$, °C (19)	$d\bar{u}/d\tau \cdot 10^{-4}$, c ⁻¹ / s ⁻¹
Пористая керамика. Пластина 120 × 80 × 5 мм. $\rho \approx 1860$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,12$; $u_p = 0$; $t_m = 49$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $N \approx 2,66 \cdot 10^{-4}$ c ⁻¹ Porous ceramics. Plate 120 × 80 × 5 mm. $\rho \approx 1860$ kg/m ³ ; $\bar{u}_0 = 0,24$; $\bar{u}_{кр} = 0,12$; $u_p = 0$; $t_m = 49$ °C. Drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 5$ %; $N \approx 2,66 \cdot 10^{-4}$ s ⁻¹							
0,10	0,83	0,785	6,5	55	56,2	56,0	2,088
0,08	0,67	0,594	11,0	63	63,5	63,2	1,58
0,06	0,50	0,410	15,0	68	71,2	71,0	1,08
0,04	0,33	0,236	21,5	78	80,5	81,4	0,629
0,02	0,18	0,108	28,5	88	90,5	91,2	0,287
0,01	0,083	0,049	33,0	101	101,5	102,0	0,108
Листовой асбест. Пластина 120 × 80 × 6 мм. $\rho \approx 770$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $u_p = 0$; $t_m = 42$ °C. Режим сушки: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $N \approx 5 \cdot 10^{-4}$ c ⁻¹ Sheet asbestos. Plate 120 × 80 × 6 mm. $\rho \approx 770$ kg/m ³ ; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $u_p = 0$; $t_m = 42$ °C. Drying mode: $t_c = 120$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 5$ %; $N \approx 5 \cdot 10^{-4}$ s ⁻¹							
0,16	0,8	0,82	10	51	49	51,2	3,74
0,14	0,7	0,73	12	53	52	54,6	3,14
0,12	0,6	0,64	14	58	57	60,2	2,57
0,08	0,4	0,44	20	69	69	71,4	1,52
0,04	0,2	0,23	24	86	84	86,6	0,62
0,02	0,1	0,12	30	93	92	94,5	0,25
Шерстяной войлок. Пластина 120 × 80 × 8 мм. $\rho \approx 200$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,74$; $u_p = 0$; $t_m = 37$ °C. Режим сушки: $t_c = 90$ °C; $v = 5$ м/с; $\varphi = 6$ %; $N \approx 8,3 \cdot 10^{-4}$ c ⁻¹ Wool felt. Plate 120 × 80 × 8 mm. $\rho \approx 200$ kg/m ³ ; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,74$; $u_p = 0$; $t_m = 37$ °C. Drying mode: $t_c = 90$ °C; $v = 5$ m/s; $\varphi = 6$ %; $N \approx 8,3 \cdot 10^{-4}$ s ⁻¹							
0,6	0,80	0,82	8	42	43,5	43,2	6,22
0,5	0,67	0,70	12	45	46,8	47,2	4,93
0,4	0,53	0,57	17	48	49,5	50,5	3,64
0,2	0,38	0,32	25	58	57,5	58,0	2,36
0,1	0,20	0,18	34	65	66,5	67,5	1,05

Заклучение. Рассмотренный метод расчета процесса сушки тонких плоских материалов основан на уравнении кинетики сушки, которое устанавливает связь между величинами, определяющими теплообмен по коэффициенту теплоотдачи и влагообмен по относительному коэффициенту сушки. Пользуясь уравнением кинетики сушки и обобщенной переменной – относительной скоростью сушки, на основе обработки экспериментальных данных процессов сушки тонких материалов получена простая экспериментальная формула для расчета температуры в периоде падающей скорости сушки.

Приведенная методика обработки экспериментальных данных может быть использована в практических расчетах сушки различных материалов.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 560 с.
3. Кудинов, А. А. Тепломассообмен / А. А. Кудинов. – М.: Инфра-М, 2022. – 375 с.
4. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Мн.: Бел. наука, 2010. – 443 с.
5. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
6. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
7. Цирельман, Н. М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса / Н. М. Цирельман. – СПб.: Лань, 2025. – 504 с.
8. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 3. – С. 584–594.
9. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
10. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 550 с.
11. Рудобашта, С. П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С. П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705–714.
12. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.
13. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки плоских влажных материалов методом обобщенных переменных / А. И. Ольшанский. // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 66–76.
14. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
15. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 884–894.
16. Ольшанский, А. И. Теплообмен при термической обработке и сушке материалов в аналитических расчетах нестационарной теплопроводности / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 5. – С. 1142–1149.

References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Lykov A. V., Mikhaylov Yu. A. *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963. 560 p. (in Russian).
3. Kudinov A. A. *Heat-Mass Transfer*. Moscow, Infra-M Publ., 2022. 375 p. (in Russian).
4. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
5. Rudobashta S. P. *Mass-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
6. Vasilyev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Basics of Heat and Mass Transfer*. Saint-Petersburg, GIORД Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
7. Tsirel'man N. M. *Theory and Applied Problems of Heat-Mass Transfer*. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2025. 504 p. (in Russian).
8. Ol'shanskii A. I. Heat transfer kinetics and experimental methods for calculating the material temperature in the drying process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 3, pp. 622–633. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0876-1>
9. Sazhin B. S. *Scientific Bases of Drying Technology*. Moscow, Nauka Publ., 1997. 447 p. (in Russian).
10. Lykov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 550 p. (in Russian).
11. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0394-3>
12. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Kinetics of heat transfer during the desiccation of moist materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/BF00832214>
13. Ol'shanskii A. I. Investigation of the process of drying of plane moist materials by the method of generalized variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 69–79. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0806-2>
14. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
15. Ol'shanskii A. I. Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 4, pp. 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>
16. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Heat Transfer During Heat Treatment and Drying of Materials in Analytical Calculations of Nonstationary Heat Conduction. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, no. 5, pp. 1134–1141. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02778-x>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>
УДК 544.6



Оригинальная статья

О. Л. Войтик*, К. И. Делендик, Н. В. Коляго, Е. В. Ковальчук, Л. Ю. Роцин

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕЦИЗИОННОГО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР ТИПА «КВАДРАТ»
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОТОЛИТОГРАФИИ И ЭЛЕКТРОХИМИИ**

Аннотация. Для повышения интенсивности охлаждения мощных электронных компонент в системах теплоотвода активно применяются теплообменные конструкции с микроструктурами, кроме того, они перспективны в электромеханических датчиках, микрофлюидных чипах для лаборатории на кристалле (LOC). Исследование направлено на решение ключевых проблем изготовления микроструктур, связанных с сохранением характерных их размеров при высоком аспектном соотношении. Представлен комбинированный метод получения прецизионных металлических микроструктур, сочетающий ультрафиолетовую пленочную сухую фотолитографию с электрохимическим осаждением из медных и никелевых сульфатных электролитов. Проведен сравнительный анализ скорости осаждения частиц металла, особенностей краевого эффекта при изготовлении никелевых и медных микроструктур, приводящих к слиянию элементов в плотные дендритные образования. Отмечено влияние формы токопроводящей рамки на качество, геометрию и равномерность роста слоев на подложке при горизонтальном осаждении в установке для электрохимической металлизации. Получены микроструктуры типа «квадрат» со следующими параметрами: высота 100 ± 5 мкм, характерный размер 180 ± 5 мкм и межэлементный шаг 90 ± 5 мкм при сохранении вертикальных боковых стенок, хорошей адгезии к подложке, минимизации дефектов при осаждении металлов и четкой воспроизводимости геометрии микроструктур. Разработанная технология обеспечивает формирование механически устойчивых микроструктур, способных выдерживать экстремальные гидродинамические нагрузки.

Ключевые слова: медные микроструктуры, никелевые микроструктуры, фотолитография, электрохимическое осаждение, электрохимия, теплообменная поверхность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Энергетические процессы и технологии», задание 2.14.1 «Разработка системы термостабилизации и процессов ее интегрирования в активную фазированную антенную решетку».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Войтик Ольга Леонидовна* – заведующий лабораторией процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-7062-042X>, e-mail: voitik@itmo.by; *Делендик Кирилл Иванович* – старший научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0002-0023-3387>, e-mail: kdelendik@yahoo.com; *Коляго Наталья Владимировна* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0005-9834-530X>, e-mail: kolyago@hmti.ac.by; *Ковальчук Евгений Викторович* – стажер младшего научного сотрудника лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, e-mail: ukpocht@yandex.by; *Роцин Леонид Юрьевич* – младший научный сотрудник лаборатории процессов переноса в микроструктурах Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0000-0001-9050-4007>, e-mail: leonid-13-99@mail.ru

Вклад авторов: *Войтик Ольга Леонидовна* – создание концепции, анализ и обобщение результатов исследования; *Делендик Кирилл Иванович* – разработка методологии исследования, интерпретация результатов исследования;

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Коляго Наталья Владимировна – работа с текстом рукописи, анализ и обобщение результатов исследования; Ковальчук Евгений Викторович – разработка оснастки, проведение экспериментального исследования; Рошин Леонид Юрьевич – проведение экспериментальных исследований, оформление и редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Совершенствование процесса прецизионного изготовления микроструктур типа «квадрат» с использованием фотолитографии и электрохимии / О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 149–157. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>

Поступила в редакцию: 03.11.2025

Доработанный вариант: 06.04.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

Original article

Olga L. Voitik*, Kirill I. Delendik, Natalia V. Kolyago, Yauheni V. Kavalchuk, Leonid Yu. Roshchyn

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PRECISION FABRICATION OF “SQUARE”-TYPE MICROSTRUCTURES USING PHOTOLITHOGRAPHY AND ELECTROCHEMISTRY

Abstract. Currently microstructured heat exchangers are widely used in heat dissipation systems to increase the cooling intensity of high-power electronic components. They also hold promise for electromechanical sensors and microfluidic chips for laboratory-on-a-chip (LOC). This research aims to address key manufacturing challenges associated with maintaining the characteristic dimensions of microstructures at high aspect ratios. A combined method for fabricating precision metal microstructures is presented on the basis of ultraviolet dry film photolithography with electrochemical deposition from copper and nickel sulfate electrolytes. A comparative analysis of the metal particle deposition rate and the edge effect characteristics during the fabrication of nickel and copper microstructures leading to the fusion of elements into dense dendritic formations is carried out. The influence of the conductive frame shape on the quality, geometry, and uniformity of layer growth on the substrate during horizontal deposition in an electrochemical metallization system is noted. Square-type microstructures with height of $100 \pm 5 \mu\text{m}$, characteristic size of $180 \pm 5 \mu\text{m}$, and interelement pitch of $90 \pm 5 \mu\text{m}$ is obtained, while maintaining vertical sidewalls, good adhesion to the substrate, minimization of defects during metal deposition and precise reproducibility of the microstructure geometry. The developed technology ensures the formation of mechanically stable microstructures capable of withstanding extreme hydrodynamic loads.

Keywords: copper microstructures, nickel microstructures, photolithography, electrochemical deposition, electrochemistry, heat exchange surface

Acknowledgments: the work was supported by the State Program of Scientific Research “Energy and Nuclear Processes and Technologies”, Subprogram “Energy Processes and Technologies” for 2021–2025, Task 2.14.1 “Development of thermal stabilization system and processes for its integration into an active phased antenna array”.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Olga L. Voitik* – Head of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-7062-042X>, e-mail: voitik@itmo.by; *Kirill I. Delendik* – Senior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-0023-3387>, e-mail: kdelendik@yahoo.com; *Natalia V. Kolyago* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0005-9834-530X>, e-mail: kolyago@hmti.ac.by; *Yauheni V. Kavalchuk* – Intern of Junior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: ykpocht@yandex.by; *Leonid Yu. Roshchyn* – Junior Researcher of the Laboratory of Transfer Processes in Microstructures at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0000-0001-9050-4007>, e-mail: leonid-13-99@mail.ru

Contribution of the authors: *Olga L. Voitik* – conceptualization, analysis and generalization of the results; *Kirill I. Delendik* – methodology, interpretation of the results; *Natalia V. Kolyago* – review and editing, analysis and generalization of the results; *Yauheni V. Kavalchuk* – development of the equipment, experimental investigation; *Leonid Yu. Roshchyn* – experimental investigation, writing and formatting of the text of the manuscript.

For citation: Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Kavalchuk E. V., Roshchyn L. Yu. Improvement of the process of precision fabrication of “square”-type microstructures using photolithography and electrochemistry. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-149-157>

Received: 03.11.2025

Modified: 06.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. С каждым годом проблема отвода тепла от энергонагруженной электроники обостряется: тепловые потоки растут, размеры уменьшаются, компоновка уплотняется, форм-фактор усложняется – все это критично сказывается на производительности, надежности, долговечности и безопасности оборудования. Увеличение тепловыделения на небольшой площади стимулирует развитие двухфазных устройств с высоким коэффициентом теплообмена. К теплообменным поверхностям предъявляется ряд требований: высокие значения коэффициента теплообмена и критического теплового потока, технологичность и масштабируемость процесса изготовления. Перспективным направлением интенсификации является структурирование теплообменной поверхности. Прирост коэффициента теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях по сравнению с плоскими и гладкими поверхностями при кипении составляет 3–7 раз [1–4].

Современные тенденции в микро- и нанотехнологиях демонстрируют устойчивый рост требований к прецизионному изготовлению функциональных микроструктур для применения в микроэлектронике, MEMS-устройствах, микрофлюидных системах [5–7].

Среди технологий получения упорядоченных металлических микроструктур следует выделить набирающую популярность технологию 3D-печати (3DP, LOM, FDM/FFF, SLS и DMLS, SLM и EBM, CLAD, EBF₃) [8]. Существенными преимуществами 3D-печати являются универсальность, простота в обращении, точность печати, хорошая воспроизводимость результатов, способность обрабатывать широкий спектр материалов, возможность изготавливать функциональные и геометрически сложные 3D-структуры. Тем не менее послойное наращивание материалов приводит к ступенчатости боковых поверхностей микродеталей и возникновению межслойного несовпадения, что может обуславливать анизотропность механических свойств [9].

Классическим способом получения микроструктур является LIGA-процесс (LIGA – Lithographie (литография), Galvanoformung (гальванопокрытие) и Abformung (формовка)), используемый для создания структур с высоким аспектным соотношением сторон [10]. Синхротронное рентгеновское излучение имеет большую мощность и сверхмалое расхождение электромагнитного пучка (не больше 0,006°), формируя ровные отвесные стенки у MEMS-конструкций [11]. Таким образом, данная технология имеет большие возможности. В качестве основных ее недостатков можно назвать необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения и высокую стоимость расходных материалов.

В этом контексте стандартные технологии микроэлектроники – фотолитография и гальваника – продолжают занимать значимую позицию среди методов микрофабрикации в сравнении с альтернативными технологиями (3D-печать металлов [9; 12], микрофрезерование, электроэрозии, LIGA-процесс [10]). Они обеспечивают высокое разрешение (до субмикронного уровня) [13], отличную воспроизводимость и масштабируемость производства, более низкую себестоимость при серийном производстве, возможность создания многоуровневых структур за счет многослойного выравнивания и тентирования. Несмотря на перспективность технологии, существует ряд проблемных задач: сохранение вертикальности боковых стенок и обеспечение высокой адгезии к подложке при высоком аспектном соотношении характерных размеров микроструктур; минимизация дефектов кромок при осаждении металлов; сохранение геометрии структуры и равномерности по высоте от центра к краям подложки. Представленное исследование сфокусировано на преодолении данных проблем.

Цель данной работы – получение медных и никелевых микроструктур типа «квадрат» на медной подложке при высоком аспектном соотношении характерных размеров микроструктур и сохранении их геометрии.

Предлагаемые технологические решения имеют значительный потенциал при изготовлении микроструктурированных теплообменных поверхностей, где критически важны точность геометрии и воспроизводимость параметров.

Материалы и методы. В качестве подложек для получения микроструктур были использованы медные пластины марки М1 размером 190 × 130 × 1 мм. Заготовки подвергались механической шлифовке; полировке; очищались в мыльном растворе; подвергались трехэтапной очистке в органических и неорганических растворителях; химически полировались (CrO_3 – 480 г/л, H_2SO_4 – 35 г/л, $T = 70^\circ\text{C}$) с использованием качающей оснастки.

При формировании микроструктур заданной геометрии электрохимическим осаждением применялся негативный пленочный фоторезист марки P50100 толщиной 100 мкм для металлизации печатных плат. Фоторезист наносился на медную заготовку с помощью ламинатора сухого резиста RLM 419p (Германия), позволяющего производить нанесение фоторезиста сразу с обеих сторон подложки.

Эскизы фотошаблонов были выполнены в программе САМ 350 и после конвертации в формат Gerber позиционировались в программе Gerber2Bitmap¹. Контроль размеров элементов осуществлялся в View FPF, управление фотоплоттером – в Flimstar². Печать фотошаблонов производилась на растровом барабанном фотоплоттере Flimstar-Plus (Bungard, Германия) со следующим графическим разрешением: диаметр наименьшей инвертированной области (прозрачная точка в черной области) – 25 мкм; наименьшее расстояние между двумя линиями – 10 мкм; наименьшее расстояние между двумя областями – 18 мкм; наименьший элемент (точка/линия) – 5 мкм.

Для получения рисунка на заготовке с фоторезистом использовалась установка экспонирования EXP8000/12000 (Германия), предназначенная для промышленного производства и оснащенная ртутно-галогенными лампами мощностью 4000 Вт. Лампы располагались на расстоянии около 90 см от печатной платы, обеспечивая почти параллельный свет. Обрабатываемые заготовки фиксировались в вакуумной раме, которая загружалась в зону экспонирования. Каждая заготовка совмещалась с напечатанным фотошаблоном и комплект помещался в установку экспонирования. Интенсивность излучения подбиралась эмпирически.

Заготовки с рисунком проявлялись в растворе (K_2CO_3 – 0,8 %, $T = 28–32$ °C, $t = 10$ мин) при постоянном контроле его концентрации, времени проявления, температуры раствора, интенсивности покачивания заготовки. Проявленные заготовки задубливались в сушильном шкафу SNOL 58/350 (Литва) при температуре 70 °C в течение 10 мин. Контроль внешнего вида и качества рисунка осуществлялся на оптическом микроскопе Euromex DZ.1805 с цифровой камерой MC6.3 (Нидерланды).

На рис. 1 представлена блок-схема технологических этапов получения упорядоченных медных и никелевых микроструктур на медной подложке с использованием фотолитографических, химических и электрохимических процессов.

Все электрохимические процессы выполнялись в вытяжном шкафу с активной приточно-вытяжной вентиляцией и постоянной температурой лабораторного помещения порядка 20 ± 1 °C. Это обусловило стабильность условий для осаждения микроструктур.

Для решения поставленных задач в Институте тепло- и массообмена НАН Беларуси разработана установка электрохимической металлизации (рис. 2).

Магнитная мешалка C-Mag HS7 Package (Германия) (1) с диапазонами нагрева от 50 до 500 °C и вращающего момента от 100 до 1500 об/мин обеспечивала перемешивание и нагрев электролита на протяжении всего процесса. Химический насос с керамическим винтом (2) проводил циркуляцию электролита в ванне для электрохимического осаждения со скоростью до 800 мл/мин, управление осуществлялось с помощью источника постоянного тока. Циркуляция поддерживала равномерное распределение температуры и концентрации электролита, что критически важно для однородности осаждения. Химический насос забирал подогретый электролит из нижней части ванны и подавал его в менее прогретую верхнюю часть. Электролит подавался через установленный в воронке фильтр, где фильтровался от анодного шлама и других механических загрязнений.

Использованная в установке гальваническая ванна (3) объемом 10 л выполнена из полипропилена, предназначена для медного и никелевого электролита. Перед началом процесса температура в ванне с электролитом выравнивалась с помощью магнитной мешалки (1) и циркуляционного насоса (2).

Анод (4) (для никеля – НПА-1, для меди – М1) был подвешен на расстоянии 50 мм над образцом, оставаясь равноудаленным от стенок гальванической ванны. Непосредственно перед установкой

¹ Изготовление фотошаблона: комплект технол. документации: ИУФГ.764416.300 / Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Мн., 2023. 12 л.

² Формирование микроструктур с использованием фотолитографических технологий: комплект технол. документации: ИУФГ.067329.300 / Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Мн., 2023. 26 л.

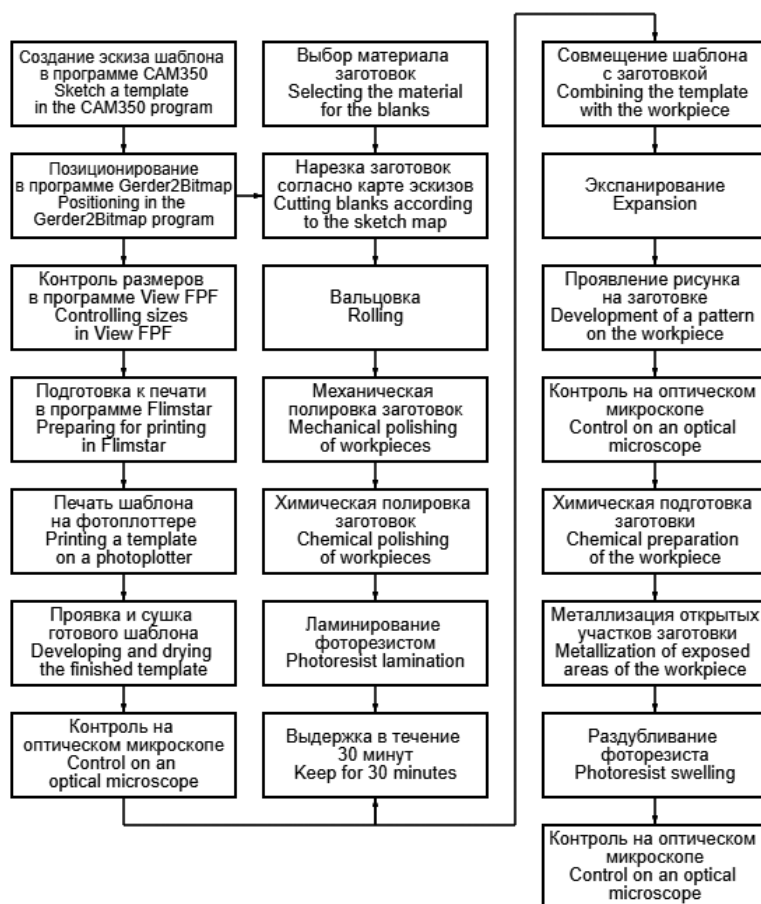


Рис. 1. Блок-схема технологии получения микроструктур типа «квадрат» на медной подложке
 Fig. 1. Block diagram of the technology for producing “square”-type microstructures on a copper substrate

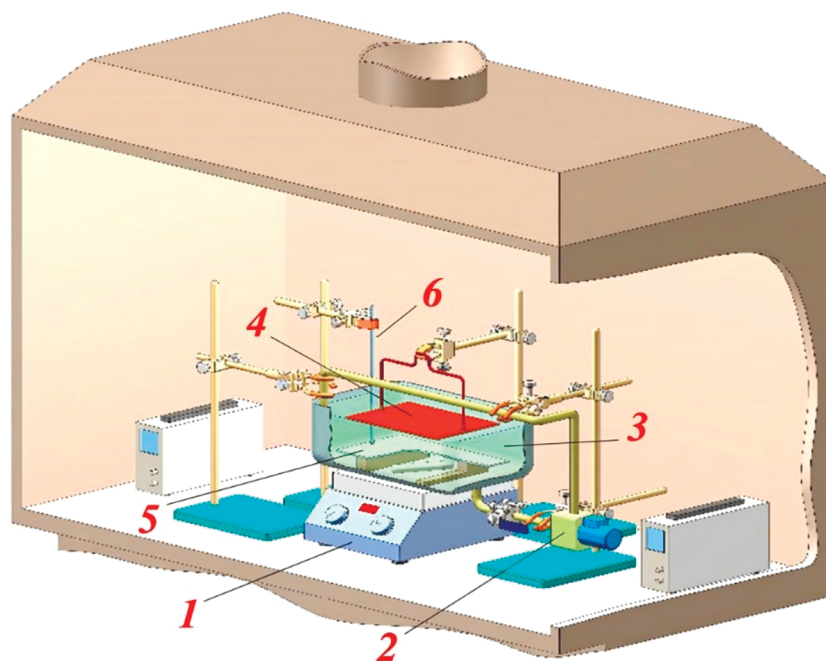


Рис. 2. Установка для электрохимической металлизации: 1 – магнитная мешалка C-Mag HS7 Package;
 2 – химический насос; 3 – ванна с электролитом; 4 – анод; 5 – катод; 6 – вибромотор
 Fig. 2. Installation for electrochemical metallization: 1 – magnetic stirrer C-Mag HS7 Package;
 2 – chemical pump; 3 – electrolyte bath; 4 – anode; 5 – cathode; 6 – vibration motore

анода в эту ванну с электролитом проводилась его чистка щеткой под горячей водой, после чего осуществлялась активация в кювете с 10%-ным раствором азотной кислоты для никелевого анода и в 12%-ном растворе соляной кислоты для медного анода.

Катодом (5) выступила подложка с размером рабочей области 70×70 мм. Катод был установлен на расстоянии 3 см от дна гальванической ванны и лежал на керамических подставках, не препятствующих работе магнитной мешалки. Вибромотор (6) был подключен к выступающему Г-образному изолированному контакту рамки. Создаваемые вибрации удаляли с поверхности структуры небольшие пузырьки водорода, препятствующие равномерному росту металла.

В результате исследований нами подобраны составы электролитов и рабочих режимов, представленные в таблице. Высота структур оценивалась на двойном микроскопе типа МИС-11 (Россия).

Электролиты для электрохимического осаждения микроструктур при плотности тока 1 A/dm^2 , температуре $20\text{--}30^\circ\text{C}$

Electrolytes for electrochemical deposition of microstructures at a current density of 1 A/dm^2 and a temperature of $20\text{--}30^\circ\text{C}$

Состав электролита для осаждения Ni Composition of electrolyte for Ni deposition		Состав электролита для осаждения Cu Composition of electrolyte for Cu deposition	
Компонент Component	Концентрация, г/л Concentration, g/l	Компонент Component	Концентрация, г/л Concentration, g/l
NiSO ₄	175	H ₂ SO ₄	70
Na ₂ SO ₄	60	CuSO ₄	250
MgSO ₄	40	C ₂ H ₅ OH	10
NaCl	9		
H ₂ BO ₄	25		

Результаты работы и их обсуждение. Разработанный технологический процесс, сочетающий прецизионную фотолитографию и электрохимическое осаждение, обеспечил формирование регулярных массивов квадратных микроструктур со следующими контролируемыми геометрическими параметрами: высота – 100 ± 5 мкм, характерный размер – 180 ± 5 мкм и межэлементный шаг – 90 ± 5 мкм. Процесс реализован на медных подложках размером 190×130 мм с эффективной рабочей зоной 70×70 мм (рис. 3, 4).

При стандартных процессах металлизации микроструктуры такого размера растут неравномерно. При вертикальном осаждении и соблюдении параметров по температуре, перемешиванию, составу электролита разница по высоте верхних и нижних микроструктур может отличаться в 1,5–2 раза, наблюдаются сильное перерастание за окна фоторезиста, а также частичное отслаивание от подложки осажденного металла. Особенно ярко выражен краевой эффект на нижних краях рабочей области.

Для решения данной проблемы подложка была расположена горизонтально. Это позволило улучшить равномерность осаждения по всей площади при тех же условиях осаждения.

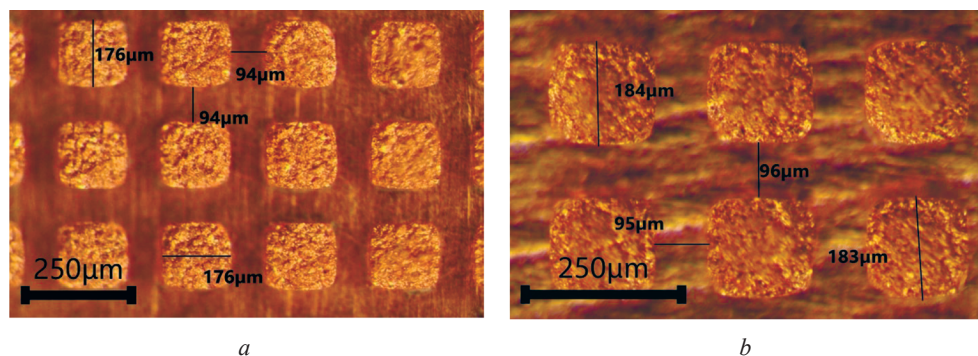


Рис. 3. Медные микроструктуры $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ мкм с шагом 90 ± 5 мкм: а – увеличение $120\times$; б – увеличение $160\times$
Fig. 3. Copper microstructures $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ μm with a step of 90 ± 5 μm : а – magnification $120\times$; б – magnification $160\times$

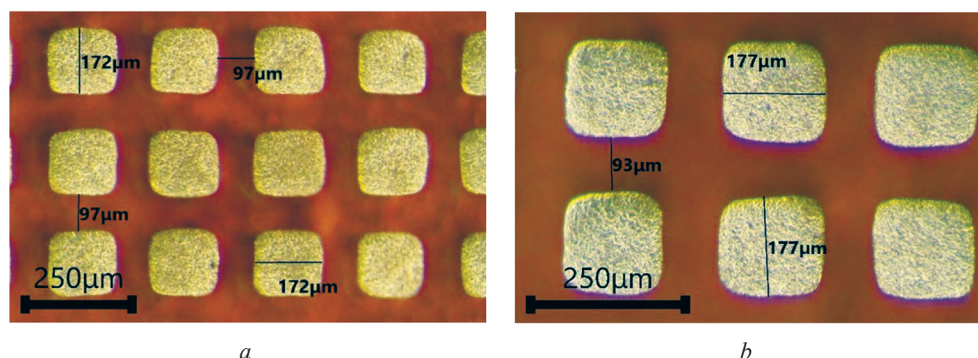


Рис. 4. Никелевые структуры $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ мкм с шагом 90 ± 5 мкм: *a* – увеличение $120\times$; *b* – увеличение $160\times$
 Fig. 4. Nickel structures $(180 \pm 5) \times (180 \pm 5)$ μm with a step of 90 ± 5 μm: *a* – magnification $120\times$; *b* – magnification $160\times$

Тем не менее, наблюдался краевой эффект, локализованный к центру рабочей области размером 7–10 мм. Лишь использование рамки с током и определенное положение позволило свести краевой эффект к величинам погрешности ± 5 мкм по всей рабочей области.

Монтаж рамки производился с помощью восьми ножек на расстоянии 1 мм от подложки. Девятая ножка представляла собой Г-образный изолированный контакт, который поднимался над электролитом по длинной стороне и подключался к источнику постоянного тока. Ножки рамки припаивались к краям подложки на заранее открытые окна. После этого остатки жидкого флюса удалялись в горячей воде, образец высушивался в сушильном шкафу при температуре 60°C в течение 5 мин. Затем внешнюю рамку и ножки покрывали химически стойким лаком и сушили при комнатной температуре в течение 4 ч. Учитывая продолжительность процесса осаждения, дополнительно края и ножки были закрыты изолирующей лентой, препятствующей пробою лака и фоторезиста.

До использования рамки наблюдалось краевое разрастание микроструктур с последующим слиянием элементов в плотные дендритные образования. Ветвистая структура полностью затягивала собой пленочный фоторезист и оказывалась существенно выше необходимой высоты (рис. 5, *a*). Рамка позволила локально увеличить площадь контакта в тех местах, где на пластину воздействует максимальный ток, забирая на себя излишки (рис. 5, *b*). В результате осаждаемый металл равномерно распределился на поверхности пластины, а геометрия микроструктур сохранилась на протяжении всего процесса.

Продолжительность электрохимического осаждения для электролита никелирования составила около 6 ч, этого было достаточно для получения микроструктур толщиной порядка 100 мкм по всей рабочей области подложки. Скорость осаждения была равна $16,6$ мкм/ч. Для получения

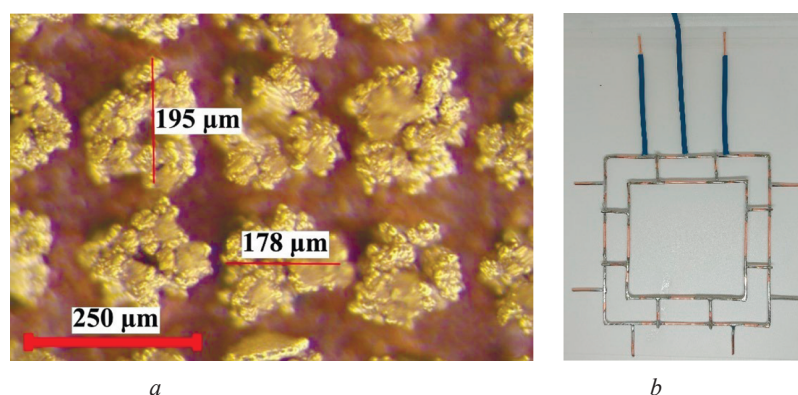


Рис. 5. Никелевые дендритные структуры, образующиеся на краях рабочей области подложки без использования токопроводящих рамок, увеличение $120\times$ (*a*), и токопроводящая рамка, используемая для электрохимических процессов (*b*)

Fig. 5. Nickel dendritic structures formed at the edges of the working area of the substrate without the use of conductive frames magnification $120\times$ (*a*), and conductive frame used for electrochemical processes (*b*)

аналогичных микроструктур с использованием медного электролита понадобилось порядка 30 ч, при этом скорость осаждения составила 3,33 мкм/ч. Осаждение меди производилось с прерыванием через каждые 2 ч для удаления с поверхности структуры хрупких механических осадков и дендритных частиц кисточкой с синтетическим ворсом.

Фоторезист Р50100 удалялся в 10%-ном растворе аммиака со всех участков подложки, кроме зон с микроструктурой, с периодическим погружением на 30–40 с в течение 5 мин. Для полного удаления остатков фоторезиста требовалось механическое воздействие щеткой с ворсом средней жесткости.

С целью проверки устойчивости к кавитации подложки с микроструктурами подвергались воздействию ультразвука (УЗ) в УЗ-ванне с дистиллированной водой. Продолжительность каждого процесса составила 20 мин с частотой 40 кГц при температуре воды $T_b = 50$ °С. Дополнительные испытания были проведены с использованием точечного УЗ-воздействия на микроструктуры с использованием низкочастотного ультразвукового диспергатора (частота 22 кГц, время обработки 20 мин при температуре воды $T_b = 50$ °С). В результате испытаний медные и никелевые микроструктуры показали устойчивость к УЗ-кавитации, сохранение геометрических параметров, отсутствие областей отслоения и видимых повреждений. Контроль осуществлялся на оптическом микроскопе с цифровой камерой.

Полученные результаты подтверждают, что разработанная технология обеспечивает формирование механически устойчивых микроструктур, способных выдерживать экстремальные гидродинамические нагрузки.

Заключение. Предложен комбинированный метод изготовления прецизионных металлических микроструктур, сочетающий стандартные фотолитографические технологии с электрохимическим осаждением. Установлено, что разработанные режимы металлизации подложек позволяют получить структуры с контролируемыми геометрическими параметрами: высотой 100 ± 5 мкм, поперечным размером 180 ± 5 мкм, межэлементным шагом 90 ± 5 мкм и с вертикальными боковыми стенками. Существенным преимуществом является сохранение геометрии микроструктур, их равномерность по высоте от центра к краям относительно всей рабочей области, хорошая адгезия к подложке, минимизация дефектов при осаждении металлов.

Такие микроструктуры могут применяться при производстве микроканальных систем охлаждения, электромеханических датчиков, микрофлюидных чипов для лаборатории-на-кристалле (LOC).

Работа вносит весомый вклад в решение проблемы микрофабрикации – преодоления разрыва между наноразмерной точностью и микроразмерной функциональностью металлических структур.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение более сложных геометрических структур микронного размера, изучение их точностных характеристик, оптимизации процесса получения микроструктур, улучшение методики удаления отработанного пленочного фоторезиста в межструктурных зонах, изучение стойкости и долговременной стабильности микроструктур при циклических нагрузках и комбинированных воздействиях (температура + вибрация + коррозия).

Список использованных источников

1. Enhancing liquid-vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces / Xiuliang Liu, Jianye Yang, Qifan Zou [et al.] // ACS Nano. – 2025. – Vol. 19, № 10. – P. 9513–9589. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15277>
2. Микропрофилированные поверхности для сверхтонких испарительно-конденсационных устройств / О. Л. Войтик, К. И. Делендик, Н. В. Коляго [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2023. – Т. 96, № 7. – С. 1901–1908. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02857-z>
3. Flow boiling instability characteristics in microchannels with porous-wall / L. X. Zong, G. D. Xia, Y. T. Ji [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 146. – Art. ID 118863. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2019.118863>
4. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. Печеркин, А. Павленко // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 2. – С. 280–312. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020149>
5. Advances of materials science in MEMS applications: A review / N. Hossain, M. Z. Al Mahmud, A. Hossain [et al.] // Results in Engineering. – 2024. – Vol. 22. – Art. ID 102115. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102115>

6. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: A review / Yingyu Xua, Shuibin Liu, Chunhua He [et al.] // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, iss. 5. – Art. ID e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
7. Mahammadrafeeq, M. Microelectronic materials, microfabrication processes, micromechanical structural configuration based stiffness evaluation in MEMS: A review / M. Mahammadrafeeq, K. B. M. Swamy // *Microelectronic Engineering*. – 2022. – Vol. 263. – Art. ID 111854. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111854>
8. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components / T. Mukherjee, J. W. Elmer, H. L. Wei [et al.] // *Progress in Materials Science*. – 2023. – Vol. 138. – Art. ID 01153. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101153>
9. Балановский, А. Е. Технология роботизированного аддитивного производства изделий сложной геометрической формы из металла / А. Е. Балановский, В. Ю. Конюхов, Р. Р. Хакимов // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2025. – Т. 81, № 1. – С. 54–60. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-1-54-60>
10. Реализация терагерцовых фильтров высоких частот на основе цельнометаллических микроструктур с использованием глубокой рентгенолитографии / А. Н. Генцелев, С. А. Кузнецов, Ф. Н. Дульцев [и др.] // *Автометрия*. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 14–27. <http://doi.org/10.15372/AUT20190202>
11. Шелованова, Г. Н. Современные проблемы микро- и наноэлектроники: учеб. пособие / Г. Н. Шелованова; Сиб. федер. ун-т, Ин-т инж. физики и радиоэлектроники. – Красноярск: СФУ, 2017. – 126 с.
12. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении: учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 280 с.
13. Анализ современного состояния исследований по управлению смачиваемостью наноструктурированных поверхностей / Л. Ю. Рошин, О. Л. Войтик, К. И. Делендик [и др.] // *Тепло- и массообмен – 2021: сб. науч. тр.* / [редкол.: О. Г. Пенязков (гл. ред.) и др.]. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2022. – С. 209–231.

References

1. Xiuliang Liu, Jianye Yang, Qifan Zou, Yongyan Hu, Pengkun Li, Li Tan, Nenad Miljkovic, Ronggui Yang. Enhancing liquid-vapor phase-change heat transfer with micro/nano-structured surfaces. *ACS Nano*, 2025, vol. 19, no. 10, pp. 9513–9589. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c15277>
2. Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Penyazkov O. G., Roshchin L. Yu. Microprofiled surfaces for hyperfine evaporative-condensing units. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2023, vol. 96, no. 7, pp. 1867–1874. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02857-z>
3. Zong L. X., Xia G. D., Ji Y. T., Liu L., Ma D. D., Wang J. Flow boiling instability characteristics in microchannels with porous-wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 146, art. ID 118863. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118863>
4. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Heat transfer enhancement at boiling and evaporation of liquids on modified surfaces – A Review. *High Temperature*, 2021, vol. 59, iss. 2–6, pp. 405–432. <https://doi.org/10.1134/S0018151X21020140>
5. Hossain N., Al Mahmud M. Z., Hossain A., Rahman Md Kh., Islam Md S., Tasnim R., Mobarak Md H. Advances of materials science in MEMS applications: A review. *Results in Engineering*, 2024, vol. 22, art. ID 102115. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102115>
6. Yingyu Xua, Shuibin Liu, Chunhua He, Heng Wu, Lianglun Cheng, Guizhen Yan, Qinwen Huang. Reliability of MEMS inertial devices in mechanical and thermal environments: A review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 5, art. ID e27481. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27481>
7. Mahammadrafeeq M., Swamy K. B. M. Microelectronic materials, microfabrication processes, micromechanical structural configuration based stiffness evaluation in MEMS: A review. *Microelectronic Engineering*, 2022, vol. 263, art. ID 111854. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2022.111854>
8. Mukherjee T., Elmer J. W., Wei H. L., Lienert T. J., Zhang W., Kou S., DebRoy T. Control of grain structure, phases, and defects in additive manufacturing of high-performance metallic components. *Progress in Materials Science*, 2023, vol. 138, art. ID 01153. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101153>
9. Balanovskii A. E., Konyukhov V. Yu., Khakimov R. R. Technology of robotic additive manufacturing of metal products with complex geometric shapes. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2025, vol. 81, no. 1, pp. 54–60 (in Russian). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2025-1-54-60>
10. Gentslev A., Kuznetsov S., Dultsev F., Goldenberg B., Zelinsky A., Kondratyev V., Tanygina D. Implementation of terahertz high-pass filters based on all-metal microstructures using deep X-ray lithography. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 115–125. <https://doi.org/10.3103/S875669901902002X>
11. Shelovanova G. N. *Modern Problems of Micro- and Nanoelectronics: A tutorial*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2017. 126 p. (in Russian).
12. Grigor'yants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I., Tret'yakov R. S. *Laser Additive Technologies in Mechanical Engineering*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 2018. 280 p. (in Russian).
13. Roshchyn L. Yu., Voitik O. L., Delendik K. I., Kolyago N. V., Kovalchuk E. V., Bykova E. P., Bondarenko A. V. Analysis of the current state of research on wettability control of nanostructured surfaces. *Teplo- i massoperenos – 2021: sbornik nauchnykh trudov* [Heat and Mass Transfer – 2021: A Collection of Scientific Papers]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2022, pp. 209–231 (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

УДК 621.38

Оригинальная статья

А. О. Зеневич¹, О. В. Кочергина^{1*}, Н. И. Мухуров²,
О. Н. Куданович², С. В. Денисюк²

¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,
ул. Ф. Скорины 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь

²ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ В ВИЗУАЛИЗАТОРАХ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Проведена оценка возможности использования кремниевых фотоумножителей (SiФЭУ) в визуализаторе для определения мощности лазера инфракрасного излучения. Объектами исследований были выбраны кремниевые фотоумножители со структурой p^+-p-p^+ модели ON Semi FC 30035 производства США. Такой прибор имеет площадь фоточувствительной поверхности, достаточную для согласования ее с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. Для проведения исследований в ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» были созданы пленки с люминофором. В результате определена равномерность чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности фотоприемника. Показано, что использование люминофоров совместно с SiФЭУ позволяет расширить область спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника на длины волн 1490 и 1550 нм инфракрасного излучения. Установлено, что обеспечить максимум отношения сигнал/шум удастся при напряжениях питания SiФЭУ, соответствующих его напряжению пробоя, для визуализатора при подаче на него инфракрасного излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм. Показана возможность использования кремниевых фотоумножителей в визуализаторе для определения мощности инфракрасного излучения.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель, визуализатор, инфракрасное излучение, люминофор, чувствительность, пороговая мощность.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор УО «Белорусская государственная академия связи», <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>, e-mail: a.zenevich@bsac.by; Кочергина Ольга Викторовна – кандидат технических наук, заведующий кафедрой радио- и информационных технологий УО «Белорусская государственная академия связи», <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>, e-mail: o.kochergina@bsac.by; Мухуров Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорик ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0000-0002-9340-4682>, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by; Куданович Олег Николаевич – заместитель заведующего лабораторией микро- и наносенсорик ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0009-0002-2898-1448>, e-mail: kudanovich@oelt.basnet.by; Денисюк Сергей Валентинович – научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорик ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», <https://orcid.org/0009-0009-0242-9680>, e-mail: denisyuk@oelt.basnet.by

Вклад авторов: Зеневич Андрей Олегович – разработка концепции исследования, создание модели исследований; Кочергина Ольга Викторовна – проведение измерений, интерпретация результатов исследований, написание и оформление текста рукописи; Мухуров Николай Иванович – разработка концепции исследований свойств люминофора; Куданович Олег Николаевич – изготовление люминофора, проведение исследований; Денисюк Сергей Валентинович – изготовление люминофора, проведение исследований.

Для цитирования: Использование кремниевых фотоумножителей в визуализаторах ближнего инфракрасного излучения / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Н. И. Мухуров [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 158–165. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

Поступила в редакцию: 22.10.2025

Доработанный вариант: 24.04.2026

Утверждена к публикации: 04.06.2026

Подписана в печать: 15.06.2026

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Andrey O. Zenevich¹, Olga V. Kochergina¹, Nikolai I. Mukhurov², Oleg N. Kudanovich², Sergey V. Denisjuk²

¹Belarusian State Academy of Telecommunications, 8/2, F. Skorina St., 220114, Minsk, Republic of Belarus

²State Scientific and Production Association of Optics, Optoelectronics and Laser Technology,
22, Logoiski Trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus

USE OF SILICON PHOTOMULTIPLIERS IN NEAR-INFRACTORY VISUALIZERS

Abstract. The feasibility of using silicon photomultipliers (SiPMs) in a visualizer for determining infrared laser power was assessed. The study subjects were the ON Semi FC 30035 p^+p-n^+ silicon photomultipliers (SiPMs) manufactured in the USA. Such a device has a photosensitive surface area sufficient to match the surface area of the visualizer, which contains the phosphor. Phosphor-coated films were created for the study at the Optics, Optoelectronics, and Laser Engineering State Scientific Research Institute. The study demonstrated uniformity of the silicon photomultiplier sensitivity across the entire photosensitive surface of the photodetector. It was demonstrated that the use of phosphors in conjunction with SiPMs allows for expanding the spectral sensitivity of the silicon photodetector to wavelengths of 1490 and 1550 nm infrared radiation. It was found that the maximum signal-to-noise ratio can be achieved with SiPM supply voltages corresponding to its breakdown voltage for the visualizer when applying infrared radiation with wavelengths of 980, 1490, and 1550 nm. The feasibility of using silicon photomultipliers in the visualizer to determine the infrared radiation power is demonstrated.

Keywords: silicon photomultiplier, visualizer, infrared radiation, phosphor, sensitivity, threshold power

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the authors: Andrey O. Zenevich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector at Belarusian State Academy of Communications, <https://orcid.org/0000-0002-3534-3885>, e-mail: a.zenevich@bsac.by; Olga V. Kochergina – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Radio and Information Technologies at Belarusian State Academy of Communications, <https://orcid.org/0000-0002-3597-0395>, e-mail: o.kochergina@bsac.by; Nikolai I. Mukhurov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Enterprise “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0000-0002-9340-4682>, e-mail: mukhurov@oelt.basnet.by; Oleg N. Kudanovich – Deputy Head of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Enterprise “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0009-0002-2898-1448>, e-mail: kudanovich@oelt.basnet.by; Sergey V. Denisjuk – Research Fellow of the Micro- and Nanosensors Laboratory at State Research and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, <https://orcid.org/0009-0009-0242-9680>, e-mail: denisyuk@oelt.basnet.by

Contribution of the authors: Andrey O. Zenevich – development of the research concept, creation of the research model; Olga V. Kochergina – measurement, interpretation of research results, writing and formatting of the manuscript; Nikolai I. Mukhurov – development of the research concept for the properties of the phosphor; Oleg N. Kudanovich – production of the phosphor, research; Sergey V. Denisjuk – production of the phosphor, research.

For citation: Zenevich A. O., Kochergina O. V., Mukhurov N. I., Kudanovich O. N., Denisjuk S. V. Use of silicon photomultipliers in near-infractory visualizers. *Vesti Natsyynal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 158–165 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-158-165>

Received: 22.10.2025

Modified: 24.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. В настоящее время для настройки лазерных систем и работы с лазерами ближнего инфракрасного излучения (ИК-излучения) применяют визуализаторы [1–3]. Данные приборы преобразуют ближнее ИК-излучение лазеров в излучение, видимое человеческим глазом. Для преобразования ИК-излучения в видимое используется специально синтезированное вещество (люминофор), обладающее антистоксовой люминесценцией.

Визуализаторы в качестве законченных устройств выпускаются, в частности, ООО «Фотонные Технологические Системы» (PhotonTechSystem LLC, Россия), ООО «Полироник» (Россия). По своей конструкции прибор зачастую представляет собой керамическую шайбу с люминофором, закрепленную в специальной оправе с ручкой. Также в визуализаторах вместо шайбы используются экран с люминофором в виде карточки, заламинированной в прозрачном пластике, или диск с наличием на его поверхности люминофора [1].

Для регистрации визуализатором ИК-излучения лазера его устанавливают перпендикулярно направлению распространения лазерного пучка. В результате чего лазерный пучок попадает на люминофор и приводит к его свечению в видимой области спектра излучения. Таким образом происходит визуальное наблюдение лазерного ИК-излучения.

Однако кроме визуального наблюдения за наличием видимого излучения люминофора визуализатора, необходимо определять мощность этого излучения и пороговый уровень мощности ИК-излучения лазера, для которого удастся визуально наблюдать это излучение. Такое определение позволяет упростить устройства контроля за ИК-излучением лазера за счет исключения оптических схем отвода части этого излучения на устройство измерения мощности. Также следует отметить, что для оптических схем отвода достаточно мощного ИК-излучения (≥ 1 кВт) необходимо использовать оптические элементы с высокой лучевой прочностью. Это усложняет и удорожает реализацию таких оптических схем. Использование визуализатора с возможностью определения мощности ИК-излучения лазера позволит упростить и удешевить оптическую схему контроля за этой мощностью.

Для определения мощности излучения люминофора визуализатора можно использовать фотоприемники, чувствительные к спектральному диапазону видимого излучения. Лучшее для решения этой задачи подходят кремниевые фотоумножители (*SiФЭУ*). Это связано с тем, что такие приборы имеют низкие напряжения питания и меньшие габариты по сравнению с электровакуумными фотоприемниками. Также у *SiФЭУ* большая площадь фоточувствительной поверхности и достаточно высокая чувствительность в видимой области спектра по сравнению с однопиксельными лавинными фотодиодами [4; 5].

При регистрации мощности излучения люминофора визуализатора для фотоприемника важным параметром выступает площадь фоточувствительной поверхности, совпадающая для оптимального решения поставленных задач с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. В этом случае не требуется оптическая система для направления видимого излучения от люминофора на фоточувствительную поверхность фотоприемника, что упрощает устройство визуализатора с возможностью определения мощности ИК-излучения лазера.

Отметим, что *SiФЭУ* имеют достаточно большую площадь фоточувствительной поверхности, подходящую для полного согласования с площадью поверхности визуализатора, на которую нанесен люминофор. Помимо этого, согласование площадей необходимо, чтобы *SiФЭУ* обеспечивали равномерность чувствительности по всей фоточувствительной поверхности. Однако в настоящее время данная характеристика фотоумножителей для различных длин волн видимого излучения не контролируется и не установлена зависимость этой характеристики от напряжения питания прибора. Определение такой характеристики и ее зависимости от напряжения питания позволит оценить возможность использования *SiФЭУ* в визуализаторах для контроля мощности ИК-излучения лазера.

Цель работы – исследование равномерности чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности и анализ возможности использования *SiФЭУ* в визуализаторе для установления постоянной мощности инфракрасного излучения лазера.

Экспериментальная установка и методика исследований. Объектами исследований были выбраны кремниевые фотоумножители со структурой $p^+ - p - n^+$ модели ON Semi FC 30035 (США). Данные фотоприемники имеют достаточно большую площадь фоточувствительной площадки (9 мм^2) и небольшое значение темновых токов (около 50 нА) при рабочих напряжениях питания. Отметим, что такая площадь фоточувствительной площадки является достаточной для согласования ее с площадью поверхности визуализатора, на которой находится люминофор. Для проведения исследований люминофор был изготовлен в ГПНО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси.

Определение равномерности чувствительности кремниевого фотоумножителя по всей фоточувствительной поверхности выполнено на разработанной для оценки возможности использования кремниевых фотоумножителей в визуализаторе по определению мощности ИК-излучения лазера экспериментальной установке (рис. 1) и согласно методике, описанной в [6; 7]. При этом оптическое пятно диаметром 500 мкм сканировалось по фоточувствительной площадке кремниевого фотоумножителя.

В состав используемого визуализатора инфракрасного лазерного излучения (П) входила шайба, выполненная в виде пластины с нанесенным на нее слоем люминофора (синтезированные порошки на основе оксида иттрия с внедренными в его матрицу эрбием и иттербием). Для синтеза применялся модифицированный метод Печини [8], включающий в себя стадии образо-

вания металлоорганических (хелатных) комплексных соединений, реакцию полимеризации (этерификации) между органической кислотой и многоатомным спиртом (например, лимонной кислотой и этиленгликолем) и кальцинирования. Данный метод был выбран в связи с его простотой, универсальностью и высокой однородностью получаемых составов по сравнению с другими методами [8].

В экспериментах осуществлялась визуализация ближнего ИК-излучения лазеров с разной длиной волны – 980, 1490 и 1550 нм, и мощностью 20 мВт и более. Приборы с упомянутыми характеристиками находят широкое применение в промышленности и системах оптической связи [9; 10].

При проведении исследований нами использовались полупроводниковые лазеры с постоянной мощностью оптического излучения 20 мВт. Отметим, что длина волны оптического излучения 980 нм соответствует области спектральной чувствительности исследуемого SiФЭУ.

Для того чтобы фотоумножитель мог регистрировать оптическое излучение, поступающее с выхода визуализатора, на него от источника питания (ИП) подавали напряжение питания, близкое или превышающее значение напряжения пробоя. Далее такое напряжение (напряжение питания) будем называть рабочим. Оно контролировалось вольтметром (Вм). Для измерения электрического тока, протекающего через SiФЭУ, использовался амперметр (А).

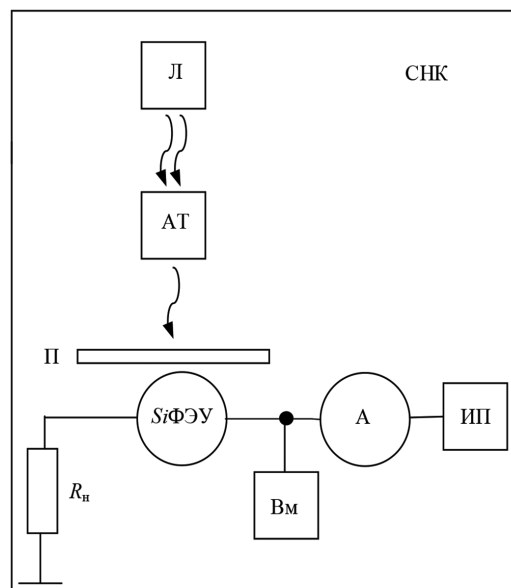


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: Л – лазер; АТ – аттенуатор; П – визуализатор; А – амперметр; Вм – вольтметр; ИП – источник питания; R_n – сопротивление нагрузки; SiФЭУ – кремниевый фотоумножитель; СНК – светонепроницаемая камера

Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: Л – laser; АТ – attenuator; П – visualizer; А – ammeter; Вм – voltmeter; ИП – power supply; R_n – load resistance; SiФЭУ – silicon photodetector; СНК – light-tight chamber

Т а б л и ц а 1. Характеристики используемого люминофора
 Table 1. Characteristics of the phosphor used

Люминофор Phosphor	Длина волны лазерного излучения, нм Laser wavelength, nm	Длина волны антистоксовой люминесценции, нм Anti-stokes luminescence wavelength, nm	Квантовый выход Quantum yield
Подложка Y_2O_3 с атомами Er:Yb в соотношении 6 : 4 Y_2O_3 substrate with Er:Yb atoms in a 6 : 4 ratio	980	650 ± 30	0,110
	1490		0,002
	1550		0,030

Напряжение пробоя кремниевого фотоумножителя ON Semi FC 30035 составляло 24,7 В. Рабочие напряжения для данного SiФЭУ выбирались в пределах не менее 0,5 В от напряжения его пробоя и не более 1,0 В. Это связано с тем, что при меньших напряжениях питания чувствительность SiФЭУ не позволяет регистрировать сигнал, а при больших величина тока, протекающего через фотоприемник, велика и может привести к его тепловому пробую.

Последовательно с SiФЭУ был включен нагрузочный резистор (R_n) для ограничения электрического тока, протекающего через фотоумножитель.

Экспериментальная установка находилась в специальной светонепроницаемой камере (СНК), что обеспечивало защиту от влияния внешних оптических излучений. Если на SiФЭУ не поступало оптическое излучение, то амперметр (А) регистрировал темновой ток (I_T). В случае поступления на SiФЭУ оптического излучения измерялся общий ток, протекающий через фотоприемник (I_{Φ}). Фототок (I_{Φ}) определялся согласно выражению $I_{\Phi} = I_{\Phi} - I_T$.

Чувствительность кремниевого фотоумножителя к ИК-излучению (S) рассчитывалась следующим образом:

$$S = \frac{I_{\Phi}}{\eta P}, \quad (1)$$

где η – квантовый выход люминофора; P – мощность излучения лазера.

Неравномерность чувствительности использованной модели SiFЭУ определялась на основании ГОСТ Р 59607–2021¹ так, как показано в [6].

При проведении исследований контролировалась зависимость отношения сигнал/шум SiFЭУ (ρ) от его напряжения питания. Величина отношения сигнал/шум кремниевого фотоумножителя вычислялась по формуле

$$\rho = \frac{I_{\Phi}}{\sqrt{2eI_{\text{тф}}FM\delta + \frac{4kT\delta}{R}}}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; F – шум-фактор; M – коэффициент усиления общего тока; δ – полоса пропускания фотоприемника; k – постоянная Больцмана; T – температура; R – электросопротивление нагрузки.

Методика определения коэффициента усиления M описана в [11]. Ранее были проведены исследования шум-фактора (F) и полосы пропускания фотоприемника (δ) [11; 12]. Значение шум-фактора составляет $F = 1$, полоса пропускания – 1,6 МГц.

Пороговая мощность для SiFЭУ (P_n) при проведении исследований определялась из следующего выражения:

$$P_n = \frac{hc}{\lambda\eta} FM\delta \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2eI_{\text{тф}}FM + \frac{4kT}{R}}{(eFM)^2\delta}} \right), \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме; λ – длина волны оптического излучения; h – постоянная Планка.

Результаты измерений и их обсуждение. Для определения напряжения питания SiFЭУ , которому соответствует его максимальная чувствительность, были измерены зависимости отношения сигнал/шум от величины перенапряжения ΔU . Измерения выполнялись при температуре окружающей среды 293 К. Отношения сигнал/шум определены для одинаковых мощностей лазерного излучения 20 мВт.

Как следует из представленных на рис. 2 зависимостей, отношение сигнал/шум для визуализатора имеет максимум при напряжениях питания, соответствующих напряжению пробоя SiFЭУ , при воздействии ИК-излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм. Такой максимум обусловлен характером изменения темнового и фототоков при увеличении напряжения питания. При $\Delta U < 0$ В наблюдается незначительное увеличение темнового и фототока, что связано с малым количеством свободных носителей в области p – n -перехода каждой из ячеек SiFЭУ . При $\Delta U > 0$ В отмечается возрастание фототока над темновым более чем в 10 раз. Рост напряжения питания фотоприемника приводит к увеличению-количества p – n -переходов, для которых напряжения питания начинают превышать напряжения их пробоя, а также к росту размеров областей лавинного умножения заряда и, соответственно, к увеличению количества свободных носителей заряда в этих областях и, как следствие, росту величины темнового тока.

¹ ГОСТ Р 59607–2021. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. 53 с.

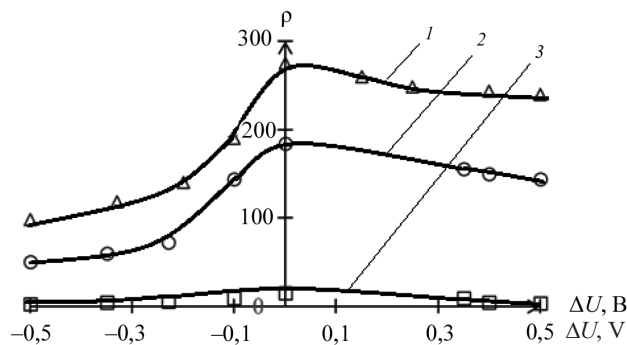


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от перенапряжения для люминесцирующего оптического излучения и длины волны лазерного излучения: кривая 1 – 980 нм; кривая 2 – 1550 нм; кривая 3 – 1490 нм

Fig. 2. Dependence of the signal-to-noise ratio on the overvoltage for luminescent optical radiation for a laser wavelength of: curve 1 – 980 nm; curve 2 – 1550 nm; curve 3 – 1490 nm

Из рис. 2 следует, что отношение сигнал/шум для люминофора при излучении лазера с длиной волны 980 нм больше, чем при излучении лазера с длинами волн 1550 и 1490 нм, и составляет $\rho = 275$, $\rho = 184$ и $\rho = 15$ соответственно. Такое отличие в значениях отношения сигнал/шум связано с разным квантовым выходом люминофора (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики визуализатора с наличием кремниевого фотоумножителя
 Table 2. Characteristics of a visualizer with a silicon photomultiplier

Люминофор Phosphor	Длина волны лазерного излучения, нм Laser wavelength, nm	Темновой ток, мкА Dark current, μA	Чувствительность люминесцирующего излучения, кА/Вт Sensitivity of luminescent radiation, kA/W	Пороговая мощность, Вт Threshold power, W
Подложка Y_2O_3 с атомами Er:Yb в соотношении 6 : 4 Y_2O_3 substrate with Er:Yb atoms in a 6 : 4 ratio	980	0,05	31,3	$2,4 \cdot 10^{-11}$
	1490		0,3	$4,6 \cdot 10^{-6}$
	1550		6,7	$9,3 \cdot 10^{-10}$

Наименьшее значение мощности инфракрасного лазерного излучения, которое удалось зарегистрировать, составило 24 пВт на длине волны 980 нм. Наибольшее значение пороговой мощности инфракрасного лазерного излучения наблюдалось для длины волны 1490 нм и составило 4,6 мкВт (см. табл. 2). Такое отличие в значениях пороговой мощности для различных длин волн инфракрасного лазерного излучения связано с различными квантовыми выходами для этих длин волн.

Экспериментальная оценка динамического диапазона визуализатора с наличием кремниевого фотоумножителя показала, что для оптического излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм он составил 4500, 4 и 300 соответственно.

На рис. 3 показана зависимость чувствительности кремниевого фотоумножителя от местоположения оптического пятна на фоточувствительной поверхности SiФЭУ при $\Delta U = 0$ В. Данная зависимость получена при сканировании оптического пятна по фоточувствительной площадке фотоприемника оптическим излучением с длиной волны 650 нм. Такая длина волны

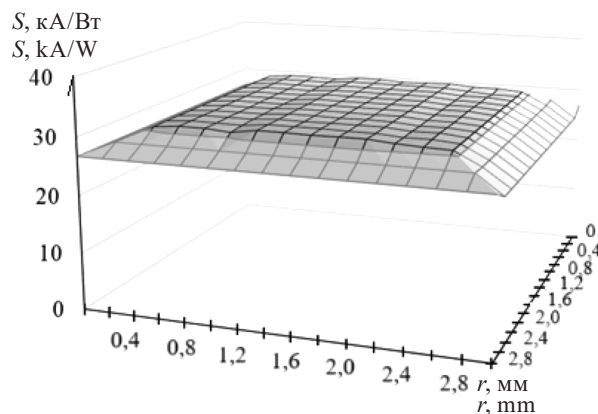


Рис. 3. Зависимость чувствительности кремневых фотоумножителей от места проецирования люминесцирующего пятна на фоточувствительную поверхность

Fig. 3. Dependence of the sensitivity of silicon photomultipliers on the location of the luminescent spot on the photosensitive surface

для сканирования была выбрана в связи с тем, что она соответствует длине волны антистоксового излучения люминофора для исследуемых длин волн инфракрасного излучения.

На 65 % площади фоточувствительной поверхности SiFЭУ чувствительность (S) составила 31,3 кА/Вт. Видно, что к краю такой поверхности значение S уменьшается до 25,2 кА/Вт. Такое изменение чувствительности к краю фоточувствительной площадки связано с особенностями технологии изготовления SiFЭУ . Таким образом, для обеспечения наибольшей чувствительности кремниевого фотоумножителя к ИК-излучению люминофор необходимо размещать на той части фоточувствительной поверхности, где чувствительность составила 31,3 кА/Вт.

Временные характеристики визуализатора в настоящей работе не рассматривались и станут предметом последующих исследований.

Заключение. Показано, что использование люминофоров совместно с SiFЭУ позволяет расширить область спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника на длины волн 1490 и 1550 нм ИК-излучения.

Установлено, что при визуализации ИК-излучения с длинами волн 980, 1490 и 1550 нм и для обеспечения максимального отношения сигнал/шум значения напряжения питания SiFЭУ должны устанавливаться на уровне напряжения пробоя фотоумножителя. Такое напряжение целесообразно использовать в качестве рабочего для обеспечения максимальной чувствительности SiFЭУ к регистрируемому излучению после воздействия на люминофор инфракрасного излучения с указанными длинами волн.

Таким образом, результаты выполненных исследований подтверждают возможность применения кремниевых фотоумножителей в визуализаторе для определения мощности ИК-излучения.

Список использованных источников

1. Овсянкин, В. В. Кооперативная сенсibilизация люминесценции в кристаллах, активированных редкоземельными ионами / В. В. Овсянкин, П. П. Феофилов // Письма в ЖЭТФ. – 1966. – № 4. – С. 471–473.
2. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе $\text{CAF}_2\text{:HO}$ / А. А. Ляпин, П. А. Рябочкина, А. Н. Чабушкин [и др.] // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 58–65. <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2014.1.05>
3. Евстропов, Т. О. Керамические визуализаторы для мощных ИК-лазеров / Т. О. Евстропов, С. С. Балабанов // Фотон-экспресс-наука. – 2023. – № 6. – С. 343–344.
4. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин, Ю. Кузнецов, Л. Филатов [и др.] // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 8. – С. 80–86.
5. Silicon photomultiplier current and prospective applications in biological and radiological photonics / M. Stagliano, F. D'Errico, L. Abegão, A. Chierici // EPN – International Journal of Science and Engineering. – 2018. – Vol. 4, iss. 4. – P. 7–15. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
6. Гулаков, И. Р. Эффективная фоточувствительная поверхность кремниевых фотоумножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия вузов. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 11. – С. 960–967. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967>
7. Гулаков, И. Р. Пространственные характеристики кремниевых фотоумножителей / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 466–477. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477>
8. Структура и люминесцентные свойства нанопорошков $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ и $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3\text{:Tm}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$, синтезированных методами твердофазного спекания и Печини / Е. И. Вайшля, Е. В. Афанасьева, В. Д. Андреева, И. Е. Колесников // Неорганические материалы. – 2021. – Т. 57, № 8. – С. 846–851. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21080327>
9. Шубин, В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем связи / В. В. Шубин. – Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. – 257 с.
10. Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М.: Техносфера, 2010. – 576 с.
11. Усиление фототока лавинными фотоприемниками при микроплазменном пробое / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, Е. В. Новиков // Успехи прикладной физики. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 117–122.
12. Зеневич, А. О. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2021. – Т. 26, № 1. – С. 30–39. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>

References

1. Ovsyankin V. V., Feofilov P. P. Cooperative sensitization of luminescence in crystals activated by rare-earth ions. *JETP Letters*, 1966, no. 4, pp. 471–473 (in Russian).
2. Lyapin A. A., Ryabochkina P. A., Chabushkin A. N., Ushakov S. N., Fedorov P. P. Visualiser of two-micron laser radiation based on $\text{CAF}_2\text{:HO}$. *Applied Photonics*, 2014, no. 1, pp. 58–65 (in Russian). <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2014.1.05>

3. Evstropov T. O., Balabanov S. S. Ceramic visualizers for high-power IR lasers. *Photon-Express-Science*, 2023, no. 6, pp. 343–344 (in Russian).
4. Klemin S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Il'in A., Popova E. Silicon Photomultiplier. New Possibilities. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8, pp. 80–86 (in Russian).
5. Stagliano M., D'Errico F., Abegão L., Chierici A. Silicon Photomultiplier: Current and Prospective Applications in Biological and Radiological Photonics. *EPH – International Journal of Science and Engineering*, 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 7–15. <https://doi.org/10.53555/eijse.v4i4.143>
6. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Effective photosensitive surface of silicon photomultipliers. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, vol. 66, no. 11, pp. 960–967 (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2023-66-11-960-967>
7. Gulakov I. R., Zenevich A. O., Kochergina O. V. Spatial characteristics of silicon photomultipliers. *Proceedings of Universities. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 4, pp. 466–477 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-4-466-477>
8. Vaishlya E. I., Afanasyeva E. V., Andreeva V. D., Kolesnikov I. E. Structure and luminescent properties of $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3$ and $\text{Gd}_2(\text{WO}_4)_3:\text{Ti}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ nanopowders synthesized by solid-phase sintering and Pechini methods. *Inorganic Materials*, 2021, vol. 57, no. 8, pp. 846–851 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002337X21080327>
9. Shubin V. V. *Information Security of Fiber-Optic Communication Systems*. Sarov, RFNC-VNIIEF Publ., 2015. 257 p. (in Russian).
10. Dmitriev S. A., Slepov N. N. *Fiber-Optic Technology: Current State and New Prospects*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2010. 576 p. (in Russian).
11. Asayonak M. A., Zenevich A. O., Kochergina O. V., Novikov E. V. Photocurrent amplification by avalanche photodetectors during microplasma breakdown. *Uspekhi prikladnoi fiziki = Advances in Applied Physics*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 117–122 (in Russian).
12. Zenevich A. O., Kochergina O. V. Study of the Dynamic Range of Silicon Photomultiplier Tubes. *News of Higher Educational Institutions. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 30–39 (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-1-30-39>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>
УДК 519.876.5Оригинальная статья**В. Ю. Юшкевич*, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин***Государственное учреждение «Республиканский научно-практический центр онкологии
и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова»,
аг. Лесной, 223040, Минский район, Минская область, Республика Беларусь***ИТЕРАТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ ПРИ ПАТОЛОГИЯХ ГРУДНОГО
И ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛОВ ПОЗВОНОЧНИКА**

Аннотация. Представлены результаты применения итеративного подхода к оптимизации многокритериальных моделей распределения дозы ионизирующего излучения для стереотаксической лучевой терапии позвоночника. В исследовании использовались две модели: базовая многокритериальная модель (SRT_Vert_BM, от англ. *Baseline Multicriteria Model*) и усовершенствованная многокритериальная модель (SRT_Vert_IM, от англ. *Iterative Multicriteria Model*). Первая построена на основе клинической выборки дозиметрических планов, вторая создана итеративным методом, при котором обучающая выборка формировалась из планов, сгенерированных исходной моделью. Валидация показала, что SRT_Vert_IM обеспечивает статистически значимое улучшение прогностических характеристик (повышение коэффициента детерминации R^2 , снижение среднеквадратичной ошибки MSE) и дозиметрических параметров для билатеральных паренхиматозных органов риска ($p < 0,05$) при сохранении клинически приемлемого покрытия целевого объема облучения. Итеративное обучение позволило повысить воспроизводимость и достоверность качества дозиметрических планов, что подтверждает перспективность данного подхода для совершенствования процесса планирования стереотаксической лучевой терапии.

Ключевые слова: итеративный метод обучения, многокритериальная модель, моделирование трехмерного распределения дозы, ионизирующее излучение, модуль RapidPlan v16.1, компьютерная система планирования облучения Eclipse v16.1, машинное обучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Юшкевич Виктория Юрьевна – медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», e-mail: yushkevich.ur@gmail.com; Петкевич Максим Николаевич – кандидат технических наук, начальник отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», <https://orcid.org/0000-0002-5137-3064>, e-mail: maxpetkevichn@gmail.com; Тарутин Игорь Германович – доктор технических наук, профессор, медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова», e-mail: itarutin1940@mail.ru

Вклад авторов: авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Для цитирования: Юшкевич, В. Ю. Итеративное обучение модели дозиметрического планирования стереотаксической лучевой терапии при патологиях грудного и поясничного отделов позвоночника / В. Ю. Юшкевич, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 2. – С. 166–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>

Поступила в редакцию: 05.12.2025

Доработанный вариант: 18.04.2026

Утверждена к публикации 04.06.2026

Подписана в печать 15.06.2026

© Юшкевич В. Ю., Петкевич М. Н., Тарутин И. Г., 2026

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Viktoryia Yu. Yushkevich*, Maksim N. Pietkevich, Igar G. Tarutin

N. N. Alexandrov National Cancer Centre,
agro-town Lesnoy, 223040, Minsk district, Republic of Belarus

**ITERATIVE TRAINING OF AN AUTOMATED DOSIMETRIC PLANNING MODEL
FOR STEREOTACTIC RADIOTHERAPY IN THORACIC AND LUMBAR SPINE PATHOLOGIES**

Abstract. The study presents the results of applying an iterative approach to optimizing automated multi-criteria ionizing radiation dose distribution models for stereotactic spine radiotherapy. Two models were used: SRT_Vert_BM (Baseline Multicriteria Model) and SRT_Vert_IM (Iterative Multicriteria Model). The former was built on a clinical dataset of dosimetric plans, while the latter was created using an iterative method where the training dataset was formed from plans generated by the baseline model. Validation demonstrated that SRT_Vert_IM provides statistically significant improvements in predictive performance (increased coefficient of determination R^2 , reduced mean squared error MSE) and dosimetric parameters for bilateral parenchymal organs at risk ($p < 0.05$) while maintaining clinically acceptable target volume coverage. Iterative training enhanced the reproducibility and reliability of dosimetric plan quality, confirming the potential of this approach for advancing automated treatment planning.

Keywords: iterative learning method, multi-criteria model, three-dimensional dose distribution modeling, ionizing radiation, RapidPlan v16.1 module, Eclipse v16.1 radiation treatment planning system, machine learning

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Viktoryia Yu. Yushkevich* – Medical Physicist of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, e-mail: yushkevich.ur@gmail.com; *Maksim N. Pietkevich* – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department for Engineering Support of Radiation Therapy at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-5137-3064>, e-mail: maxpetkevichn@gmail.com; *Ihar G. Tarutin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Medical Physicist of the Medical Physicist and Engineering Department at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, e-mail: itarutin1940@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to the writing of the article.

For citation: Yushkevich V. Yu., Pietkevich M. N., Tarutin I. G. Iterative training of an automated dosimetric planning model for stereotactic radiotherapy in thoracic and lumbar spine pathologies. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-2-166-176>

Received: 05.12.2025

Modified: 18.04.2026

Approved for publication: 04.06.2026

Signed to the press: 15.06.2026

Введение. Стереотаксическая лучевая терапия (СЛТ) позвоночника применяется при лечении метастатических и радиорезистентных новообразований, обеспечивая локальный контроль опухоли и снижение болевого синдрома. Особенностью данной методики является необходимость достижения высокой конформности и субмиллиметровой точности распределения дозы при минимизации нагрузки на критические структуры, прежде всего на спинной мозг. Топографо-анатомические особенности позвоночного столба обуславливают сложность планирования: целевые объемы часто граничат с органами риска, что требует многокритериальной оптимизации распределения дозы ионизирующего излучения [1].

Несмотря на развитие технологий, процесс дозиметрического планирования остается трудоемким и подверженным субъективным факторам, связанным с опытом медицинского физика и неоднозначностью клинических сценариев. Системы планирования лучевой терапии, основанные на анализе баз данных оптимальных планов, позволяют стандартизировать процесс и повысить воспроизводимость качества. Одним из наиболее распространенных решений является использование предиктивных многокритериальных моделей, формируемых в модуле RapidPlan системы Eclipse (Varian Medical Systems). Однако точность прогноза таких моделей зависит от качества обучающей выборки, что ограничивает их эффективность в клинической практике [2; 3].

В данной работе предложен подход итеративного обучения, при котором новая модель формируется на основе планов, сгенерированных исходной моделью. Такой метод позволяет устранить артефакты и скорректировать неточности, связанные с ограниченностью исходной библиотеки дозиметрических планов. Для исследования разработаны и проанализированы две многокритериальные модели: SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM.

Цель работы – сравнительная оценка их прогностической способности и клинической применимости в задачах дозиметрического планирования СЛТ позвоночника.

Материалы и методы. Для исследования сформирована выборка из 52 пациентов с метастатическими или радиорезистентными новообразованиями грудного (29) и поясничного (23) отделов позвоночника, получавших лечение методом СЛТ в ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова» в 2020–2025 гг. Исключены случаи локализаций ниже уровня L2–L3, что обусловлено анатомическим окончанием спинного мозга и необходимостью стандартизации объемов для построения моделей.

Анатомические характеристики пациентов и целевые объемы облучения представлены в табл. 1 в виде среднего значения, стандартного отклонения и диапазона. В набор включены целевые объемы облучения GTV (от англ. *Gross Tumor Volume*), CTV (от англ. *Clinical Target Volume*), PTV (от англ. *Planning Target Volume*) и критические органы риска (аорта, пищевод, сердце, легкие, почки, спинной мозг, спинномозговой канал). Такая форма представления обеспечивает репрезентативность выборки для построения математических зависимостей между геометрическими параметрами и дозиметрическими характеристиками [4].

Т а б л и ц а 1. Анатомические характеристики пациентов и целевые объемы облучения
T a b l e 1. Anatomical patient characteristics and target volumes

Структура Structure	Среднее значение ± стандартное отклонение [диапазон значений], см ³ Mean ± standard deviation [range of values], cm ³
GTV	2,8 ± 1,4 [0,4; 5,2]
CTV	35,6 ± 11,7 [15,3; 55,8]
PTV	74,2 ± 10,4 [56,2; 92,1]
Аорта Aorta	109,8 ± 11,5 [89,9; 129,7]
Легкое левое Left lung	2309,6 ± 167,9 [2018,8; 2600,4]
Легкое правое Right lung	2754,2 ± 146,1 [2501,2; 3007,3]
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	5063,8 ± 313,9 [4520,0; 5607,7]
Пищевод Esophagus	21,1 ± 2,0 [17,6; 24,6]
Почка левая Left kidney	120,9 ± 9,6 [104,3; 137,6]
Почка правая Right kidney	123,9 ± 8,4 [109,3; 138,4]
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	244,8 ± 18,01 [213,6; 276,0]
Сердце Heart	276,2 ± 16,5 [247,6; 304,8]
Спинномозговой канал Spinal canal	51,9 ± 2,5 [47,5; 56,3]
Спинной мозг Spinal cord	29,1 ± 0,1 [27,4; 30,8]

Протокол визуализации и предлучевой подготовки. КТ-симуляция выполнена с шагом 1 мм и расширенной зоной визуализации не менее 15 см за пределами планируемого поля, включая позвонки от C1 до S1. Такое решение обеспечило возможность точной идентификации анатомических структур вдоль всего позвоночного столба. Для верхнегрудного отдела применена укладка пациента с поднятыми руками, что позволяло использовать некомпланарные дуги при построении дозиметрического плана. Для поясничного отдела руки фиксировались вдоль тела.

Совмещение КТ- и МРТ-изображений выполнено с точностью 1 мм, что исключало артефакты от костных структур и обеспечивало корректное определение анатомических границ спинного

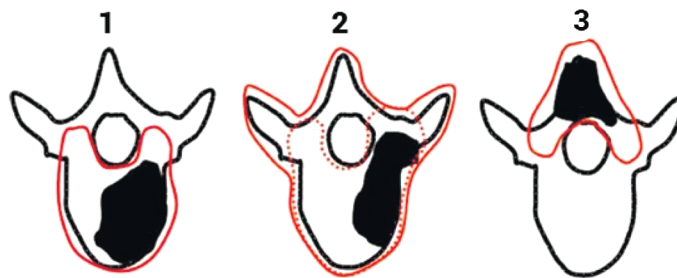


Рис. 1. Схематическое представление целевых объемов, где: 1 – пример контурирования для патологий грудного отдела позвоночника, 2 – пример контурирования для патологий поясничного отдела позвоночника, 3 – пример контурирования для патологий шейного отдела позвоночника [5]

Fig. 1. Schematic representation of target volumes, where: 1 – example of contouring for thoracic spine pathologies, 2 – example of contouring for lumbar spine pathologies, 3 – example of contouring for cervical spine pathologies [5]

мозга. Имобилизация выполнена с применением термопластических масок или вакуумных матрасов; подколенный клин и абдоминальная компрессия использованы для снижения дыхательных артефактов. В ряде случаев применена респираторная синхронизация (RPM-система), которая позволила уменьшить амплитуду дыхательных смещений на 30–40 % и обеспечить точность позиционирования в пределах ± 2 –3 мм.

Определение целевых объемов и критических структур. Контурирование целевых объемов выполнено в соответствии с рекомендациями протоколов RTOG и схематично представлено на рис. 1. Определены три ключевых объема:

GTV – макроскопически видимый опухолевый очаг по данным МРТ с контрастированием;

CTV – клинический объем, включающий пораженный позвонок без спинного мозга;

TV – планируемый объем, сформированный с учетом погрешности иммобилизации (1–2 мм).

Критические структуры включали аорту, сердце, пищевод, легкие, почки, спинной мозг и спинномозговой канал. Для каждой из структур задавались строгие дозовые ограничения согласно международным протоколам¹.

Методика планирования стереотаксической лучевой терапии. Планы облучения построены методом ротационного облучения с переменными характеристиками излучения (VMAT, от англ. *Volumetric Modulated Arc Therapy*) с использованием 2–4 компланарных и некомпланарных дуг. Применен линейный ускоритель TrueBeam (Varian Medical Systems) с энергией фотонов 6 МэВ в режиме без выравнивающего фильтра (FFF, от англ. *Flattening Filter Free*) при мощности дозы до 2400 МЕ/мин. Оптимизация выполнена алгоритмом Photon Optimizer v16.1; финальное распределение дозы рассчитано с помощью алгоритма Acuros XB v16.1 [5].

Использован гипофракционированный режим: 6 Гр $\times$ 5 фракций. Для точного моделирования дозиметрического распределения применена расчетная сетка 1,25 мм, что особенно важно для мелких структур, таких как спинной мозг и спинномозговой канал.

Формирование многокритериальных моделей дозиметрического планирования. В рамках исследования разработаны две модели:

SRT_Vert_BM – базовая многокритериальная модель, обученная на клинической выборке оптимальных планов СЛТ позвоночника [6];

SRT_Vert_IM – усовершенствованная модель, обученная итеративным методом на планах, сгенерированных SRT_Vert_BM.

Модель SRT_Vert_BM формировалась в модуле RapidPlan путем анализа 52 дозиметрических планов, соответствующих строгим критериям клинического качества. На основе геометрических характеристик целевых объемов и органов риска формировались зависимости, связывающие анатомические параметры с дозиметрическими характеристиками (DVH, от англ. *Dose-Volume Histogram*) [7].

¹ Radiation Therapy Oncology Group (RTOG). RTOG 0631 Spine: A Phase II/III Study of Image-Guided Radiosurgery. SBRT for Localized Spine Metastasis. 2013. URL: <https://www.rtog.org/ClinicalTrials/ProtocolTable/StudyDetails.aspx?study=0631> (date of access: 01.02.2025); IBA Dosimetry. Normal tissue constraints for SRS/SBRT. Louvain-la-Neuve, Belgium: IBA Dosimetry, 2022. URL: https://www.iba-dosimetry.com/fileadmin/user_upload/products/02_radiation_therapy/myqa_srs/iba_dose_constraints_poster_rev2_0522.pdf (date of access: 10.10.2024).

Модель SRT_Vert_IM создана методом повторного обучения: в качестве обучающей базы использованы планы, сгенерированные SRT_Vert_BM. Такой подход обеспечил последовательное уточнение прогностических зависимостей, позволил устранить артефакты, связанные с ограниченностью исходной базы, и повысил точность прогнозирования дозиметрических параметров. Итеративный метод обеспечил структурную избыточность данных, что позволило уменьшить риск переобучения и повысить устойчивость модели при применении к новым клиническим случаям.

Параметры оптимизации. Ограничения для целевых объемов и органов риска включали верхние (Upper, от англ. *Upper Constraint*) и нижние (Lower, от англ. *Lower Constraint*) ограничения дозы, допустимые объемные доли, ограничение на среднюю дозу (Mean, от англ. *Mean Dose Constraint*), линейное ограничение (Line, от англ. *Line Constraint*) и ограничение на обобщенную эквивалентную равномерную дозу (gEUD, от англ. *generalized Equivalent Uniform Dose*) [8; 9].

Приоритеты задавались с учетом клинической значимости структур: максимально допустимая доза для объема спинного мозга и спинномозгового канала, аорты, легких, пищевода и PTV – Upper. Минимальная доза, которую должны получить GTV и CTV, – Lower. Контроль средней дозы по всему объему левой и правой почек – Mean. Ограничение, заданное вдоль кривой DVH, для аорты, легких, пищевода, сердца и почек – Line. Преобразование неоднородного распределения дозы в эквивалентную равномерную дозу, учитывая радиобиологические параметры, для спинного мозга и спинномозгового канала – gEUD. Также использовались автоматически созданные параметры оптимизации, которые система генерирует на основе предсказанных DVH для всех органов риска, – Generated (от англ. *Generate*) [10].

Для PTV критерием нормализации являлась средняя доза. Подробные параметры оптимизации представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Критерии оптимизации

Table 2. Optimization objectives

Структура Structure	Параметр Parameter	Объем, % Volume, %	Характеристика распределения дозы Dose distribution characteristics	gEUD
GTV	Lower	100	105 %	
CTV	Lower	100	100 %	
PTV	Upper	0	110 %	
	Lower	100	95 %	
Аорта Aorta	Upper	Generated	50 %	
	Upper	Generated	70 %	
	Upper	Generated	30 %	
	Line	Generated	Generated	
Легкое левое Left lung	Upper	Generated	20 Гр / 20 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Легкое правое Right lung	Upper	Generated	20 Гр / 20 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	Line	Generated	Generated	
Пищевод Esophagus	Upper	0	Generated	
	Upper	5	Generated	
	Upper	15	Generated	
	Upper	50	Generated	
	Line	Generated	Generated	
Почка левая Left kidney	Mean	–	Generated	
	Line	Generated	Generated	
Почка правая Right kidney	Mean	–	Generated	
	Line	Generated	Generated	

Окончание табл. 2

Структура Structure	Параметр Parameter	Объем, % Volume, %	Характеристика распределения дозы Dose distribution characteristics	gEUD
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	Mean	—	10 Гр / 10 Gy	
	Line	Generated	Generated	
Сердце Heart	Line	Generated	Generated	
Спинальный мозг и спинномозговой канал Spinal cord and spinal canal	Upper	Generated	5 %	
	Upper	Generated	15 %	
	Upper	Generated	30 %	
	Upper	Generated	45 %	
	Upper	Generated	60 %	
	Upper	Generated	75 %	
	Upper gEUD		Generated	40
	Upper gEUD		Generated	25

Методы валидации и статистический анализ. Валидация эффективности моделей выполнена на независимой выборке из 20 пациентов. Для каждого случая сформированы планы с использованием моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM [11]. Сравнительный анализ проведен по следующим критериям:

- покрытие PTV ($V_{100} \% \geq 95 \%$, $D_{99} \% \geq 99 \%$),
- покрытие CTV и GTV ($V_{100} \% \geq 100 \%$, $D_{99} \% \geq 99 \%$),
- дозовая нагрузка на органы риска ($D_{\max}$, D_{mean}),
- коэффициент детерминации (R^2),
- среднеквадратичная ошибка (MSE, от англ. *Mean Squared Error*),
- χ^2 -метрика.

Для снижения риска переобучения применена десятикратная кросс-валидация (10-fold cross-validation). Дополнительно использованы методы многомерного анализа: метод главных компонент (PCA, от англ. *Principal Component Analysis*) для сокращения размерности и регрессионный анализ с целью выявления ключевых факторов, влияющих на распределение дозы. Такой подход обеспечил комплексную оценку математической адекватности и клинической применимости моделей [12].

Результаты и их обсуждение. Математическая оценка эффективности моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM выполнена на основе статистических показателей, формируемых в модуле *Model Configuration* по завершении машинного обучения. В табл. 3 представлены коэффициенты детерминации (R^2), MSE и χ^2 -метрики для основных органов риска.

Таблица 3. Статистические показатели качества моделей SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM

Table 3. Statistical parameters of SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM models

Структура Structure	R^2 (BM)	R^2 (IM)	χ^2 (BM)	χ^2 (IM)	MSE (BM)	MSE (IM)
Аорта Aorta	0,724	0,845	1,008	1,025	0,026	0,007
Легкое левое Left lung	0,720	0,901	1,254	1,182	0,015	0,002
Легкое правое Right lung	0,512	0,833	1,007	1,130	0,033	0,008
Легкие (левое и правое) Lungs (left and right)	0,563	0,915	1,351	1,183	0,014	0,009
Пищевод Esophagus	0,824	0,917	1,099	1,248	0,005	0,001

Окончание табл. 3

Структура Structure	R ² (BM)	R ² (IM)	χ^2 (BM)	χ^2 (IM)	MSE (BM)	MSE (IM)
Почка левая Left kidney	0,503	0,785	1,014	1,135	0,093	0,009
Почка правая Right kidney	0,571	0,701	1,013	1,121	0,028	0,008
Почки (левая и правая) Kidneys (left and right)	0,612	0,894	1,454	1,157	0,013	0,009
Сердце Heart	0,745	0,856	1,065	1,149	0,029	0,005
Спинномозговой канал Spinal canal	0,816	0,845	1,047	1,102	0,029	0,009
Спинальный мозг Spinal cord	0,834	0,871	1,083	1,174	0,013	0,005

Анализ показал, что коэффициент детерминации (R^2), отражающий долю объясняемой дисперсии, увеличен практически для всех органов риска, особенно для билатеральных паренхиматозных (парных) структур, таких как легкие и почки. Так, для легких (левое и правое) R^2 возрос от 0,563 до 0,915, для почек (левой и правой) – от 0,612 до 0,894, что свидетельствует о повышении прогностической способности модели SRT_Vert_IM [12].

Оптимальные значения χ^2 -метрики лежат в пределах 1,1–1,2, что соответствует приемлемому согласованию наблюдаемых и предсказанных данных. Полученные результаты подтверждают улучшение качества регрессионных зависимостей при переходе от базовой модели к усовершенствованной [12; 13].

Дополнительно рассчитана MSE, характеризующая отклонение прогнозируемых DVH от реальных данных. Для спинного мозга MSE снижена с 0,0126 до 0,0051, что соответствует уменьшению погрешности на 40 %. Для аорты, пищевода и сердца уменьшение MSE составило 30, 16 и 27 % соответственно, что эквивалентно снижению неопределенности дозиметрического распределения на 0,5–1,5 Гр в клинических планах. Для парных органов (легкие и почки) уменьшение MSE составило 66–68 %, что эквивалентно – 2,5–3,0 Гр.

Регрессионные зависимости между геометрическими и дозиметрическими параметрами продемонстрировали различия в характере признаков (рис. 2). Для базовой модели SRT_Vert_BM прогноз строился с использованием комбинации геометрических факторов (объем мишени, зона перекрытия с органом риска), что приводило к неустойчивости результатов и кластеризации данных. В усовершенствованной модели SRT_Vert_IM в качестве ключевого признака использована первая главная компонента (PCS-1, от англ. *Principal Component Score*), что позволило устранить эффект кластеризации и обеспечить более точное соответствие прогнозируемых и реальных DVH [14; 15].

Особое значение имеет корректировка признаков для спинного мозга, пищевода, сердца и аорты. В SRT_Vert_BM объем спинного мозга использовался как прогностический фактор, что методологически некорректно, поскольку клинически значимым параметром является $D_{\max}$. В SRT_Vert_IM этот признак исключен, что улучшило интерпретацию регрессионных зависимостей, повысило коэффициент детерминации R^2 (от 0,675 до 0,842) и снизило MSE. Таким образом, усовершенствованная модель продемонстрировала более высокую клиническую релевантность.

Дозиметрическая оценка выполнена на валидационной выборке из 20 пациентов. Для парных органов риска установлено статистически значимое снижение средней дозы. Так, для почек D_{mean} уменьшилась на 5 % ($p < 0,05$). Для легких снижение составило в среднем 1 %. Для спинного мозга и спинномозгового канала существенного улучшения качества не выявлено: $D1$ % увеличилась на 3–4 %, однако различия статистически незначимы. Это объясняется применением жестких верхних ограничений с высоким приоритетом, которые ограничивают потенциал модели по оптимизации DVH.

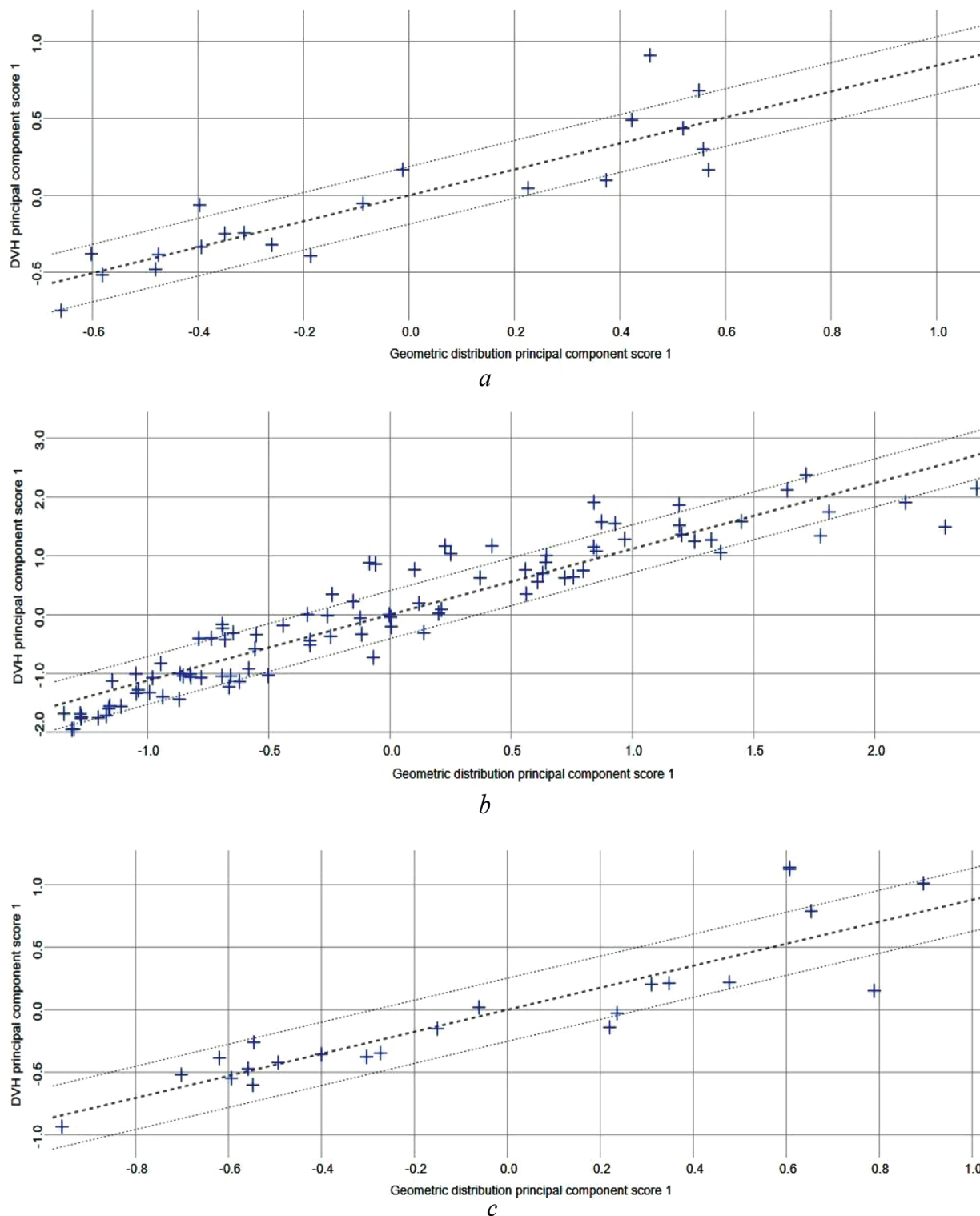


Рис. 2. Графики регрессии, где: *a*, *b* – регрессионные зависимости для легких, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно; *c*, *d* – регрессионные зависимости для почек, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно; *e*, *f* – регрессионные зависимости для спинного мозга, полученные с помощью SRT_Vert_BM и SRT_Vert_IM соответственно (начало рисунка; окончание см. на с. 174)

Fig. 2. Regression plots where: *a*, *b* – show regression dependencies for the lungs obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively; *c*, *d* – show regression dependencies for the kidneys obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively; *e*, *f* – show regression dependencies for the spinal cord obtained using SRT_Vert_BM and SRT_Vert_IM, respectively (beginning of the Figure; ending see on p. 174)

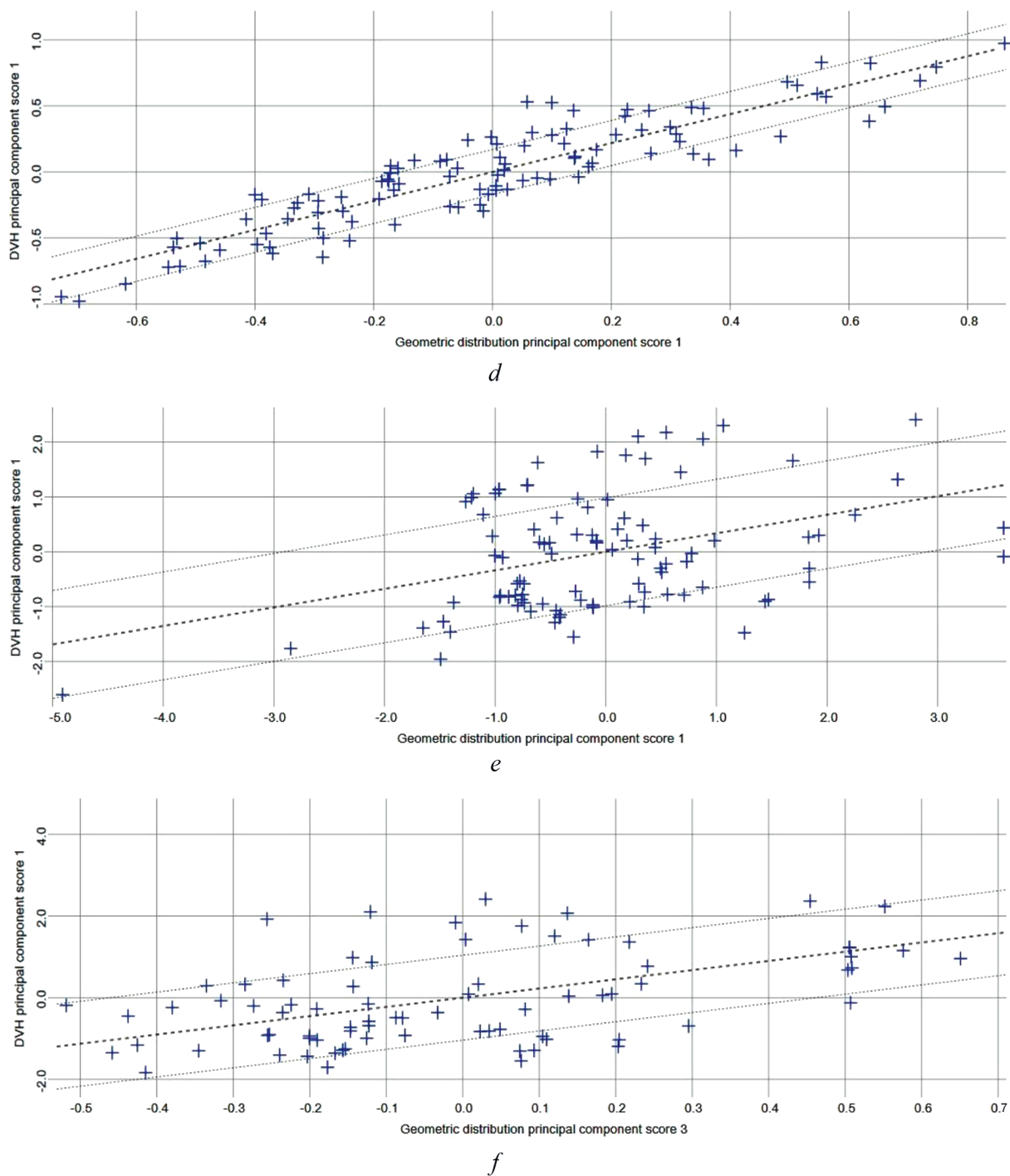


Рис. 2. Окончание (начало см. на с. 173)

Fig. 2. Ending (see the beginning on p. 173)

Таким образом, результаты подтверждают, что усовершенствованная модель SRT_Vert_IM обеспечивает:

- повышение статистических показателей качества ($R^2 \uparrow$ на 0,10–0,15, $MSE \downarrow$ на 30–40 %);
- улучшение прогноза для парных органов риска с клинически значимым снижением дозовых нагрузок;
- сохранение адекватного покрытия целевого объема облучения ($V95\% \text{ PTV} \geq 98\%$);
- устранение методологических артефактов, связанных с некорректным выбором прогностических признаков, в базовой модели.

Заклучение. В результате исследования разработана и апробирована усовершенствованная многокритериальная модель дозиметрического планирования методом СЛТ (SRT_Vert_IM), сформированная на основе планов, сгенерированных базовой моделью (SRT_Vert_BM).

Получены статистически подтвержденные улучшения прогностических характеристик разработанной модели по сравнению с базовой: коэффициент детерминации R^2 увеличен на 0,10–0,15, MSE снижена на 30–40 %, устранены признаки кластеризации и некорректные регрессионные зависимости.

Клинический анализ показал уменьшение дозовой нагрузки на парные органы риска: средняя доза на почки снижена на 5 % ($p < 0,05$), на легкие – на 1 %, при сохранении нормируемого покрытия целевого объема облучения ($V95 \% \geq 98 \%$). Для аорты, сердца, пищевода и спинного мозга существенных различий между моделями не выявлено, что обусловлено применением жестких ограничений с высоким приоритетом.

Экспериментальные данные подтверждают эффективность итеративного обучения как метода совершенствования систем многокритериального дозиметрического планирования. Использование модели SRT_Vert_IM позволяет повысить точность прогнозирования дозо-объемных характеристик, воспроизводимость качества планов и достоверность оценки дозовой нагрузки на органы риска, что имеет прикладное значение для развития систем верификации и оптимизации динамической лучевой терапии.

Модель SRT_VERT_IM не содержит идентифицирующей информации о пациентах, что дает возможность внедрения ее в клиническую практику других медицинских учреждений при условии проведения тщательной валидации и адаптации, обеспечивающей соответствие клинической картине медицинского учреждения.

Список использованных источников

1. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice / M. Teoh, C. H. Clark, K. Wood [et al.] // *The British Journal of Radiology*. – 2011. – Vol. 84, № 1007. – P. 967–996. <https://doi.org/10.1259/bjr/22373346>
2. Intercenter validation of a knowledge based model for automated planning of volumetric modulated arc therapy for prostate cancer. The experience of the German RapidPlan Consortium / C. Schubert, O. Waletzko, C. Weiss [et al.] // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12, № 5. – Art. ID e0178034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178034>
3. Is it possible for knowledge-based planning to improve intensity modulated radiation therapy plan quality for planners with different planning experiences in left-sided breast cancer patients? / J. Wang, W. Hu, Z. Yang [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – Art. ID 85. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0822-z>
4. Reducing inter- and intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution / A. Scaggion, M. Fusella, A. Roggio [et al.] // *Physica Medica*. – 2018. – Vol. 53. – P. 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.cjmp.2018.08.011>
5. Lahanas, M. Multiobjective inverse planning for intensity modulated radiotherapy with constraint-free gradient-based optimization algorithms / M. Lahanas, E. Schreibmann, D. Baltas // *Physics in Medicine and Biology*. – 2003. – Vol. 48, № 17. – P. 2843–2871. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/17/307>
6. Петкевич, М. Н. Разработка и машинное обучение многокритериальной модели распределения дозы ионизирующего излучения в системе планирования лечения Eclipse / М. Н. Петкевич, В. Ю. Юшкевич // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 166–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176>
7. Shiraishi, S. Knowledge-based prediction of three-dimensional dose distributions for external beam radiotherapy / S. Shiraishi, K. L. Moore // *Medical Physics*. – 2016. – Vol. 43, № 1. – Art. ID 378. <https://doi.org/10.1118/1.4938583>
8. Pareto navigation – algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning / M. Monz, K. H. Küfer, T. R. Bortfeld, C. Thieke // *Physics in Medicine and Biology*. – 2008. – Vol. 53, № 4. – P. 985–998. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/4/011>
9. Assessment of a model based optimization engine for volumetric modulated arc therapy for patients with advanced hepatocellular cancer / A. Fogliata, P. M. Wang, F. Belosi [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2014. – Vol. 9. – Art. ID 236. <https://doi.org/10.1186/s13014-014-0236-0>
10. RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit / A. Fogliata, G. Reggiori, A. Stravato [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2017. – Vol. 12, № 1. – Art. ID 73. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0805-0>
11. A broad scope knowledge based model for optimization of VMAT in esophageal cancer: validation and assessment of plan quality among different treatment centers / A. Fogliata, G. Nicolini, A. Clivio [et al.] // *Radiation Oncology*. – 2015. – Vol. 10. – Art. ID 234. <https://doi.org/10.1186/s13014-015-0545-y>

12. An analysis of knowledge-based planning for stereotactic body radiation therapy of the spine / J. J. Foy, R. Marsh, R. K. Ten Haken [et al.] // *Practical Radiation Oncology*. – 2017. – Vol. 7, № 5. – P. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007>
13. Highly efficient training, refinement, and validation of a knowledge-based planning quality-control system for radiation therapy clinical trials / N. Li, R. Carmona, I. Sirak [et al.] // *International Journal of Radiation Oncology – Biology – Physics*. – 2017. – Vol. 97, № 1. – P. 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.09.022>
14. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan // *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. – Palo Alto, CA: Varian Medical Systems, 2014. – P. 219–229. URL: https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/EclipsePhotonElectronAlgorithmsRef_0.pdf (date of access: 01.02.2025).
15. Machine learning and modeling: Data, validation, communication challenges / I. El Naqa, D. Ruan, G. Valdes [et al.] // *Medical Physics*. – 2018. – Vol. 45, № 10. – P. 834–840. <https://doi.org/10.1002/mp.12811>

References

1. Teoh M., Clark C.H., Wood K., Whitaker S., Nisbet A. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice. *The British Journal of Radiology*, 2011, vol. 84, no. 1007, pp. 967–996. <https://doi.org/10.1259/bjr/22373346>
2. Schubert C., Waletzko O., Weiss C., Voelzke D., Toperim S., Roeser A., Puccini S. [et al.]. Intercenter validation of a knowledge based model for automated planning of volumetric modulated arc therapy for prostate cancer. The experience of the German RapidPlan Consortium. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 5, art. ID e0178034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178034>
3. Wang J., Hu W., Yang Z., Chen X., Wu Z., Yu X., Guo X. [et al.]. Is it possible for knowledge-based planning to improve intensity modulated radiation therapy plan quality for planners with different planning experiences in left-sided breast cancer patients? *Radiation Oncology*, 2017, vol. 12, no. 1, art. ID 85. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0822-z>
4. Scaggion A., Fusella M., Roggio A., Bacco S., Pivato N., Rossato M. A., Peña L. M. A., Paiusco M. Reducing inter- and intra-planner variability in radiotherapy plan output with a commercial knowledge-based planning solution. *Physica Medica*, 2018, vol. 53, pp. 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.08.011>
5. Lahanas M., Schreibmann E., Baltas D. Multiobjective inverse planning for intensity modulated radiotherapy with constraint-free gradient-based optimization algorithms. *Physics in Medicine and Biology*, 2003, vol. 48, no. 17, pp. 2843–2871. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/17/307>
6. Pietkevich M. N., Yushkevich V. Yu. Development and machine learning of a multi-criteria ionizing radiation dose distribution model in the Eclipse treatment planning system. *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-2-166-176>
7. Shiraishi S., Moore K.L. Knowledge-based prediction of three-dimensional dose distributions for external beam radiotherapy. *Medical Physics*, 2016, vol. 43, no. 1, art. ID 378. <https://doi.org/10.1118/1.4938583>
8. Monz M., Küfer K. H., Bortfeld T. R., Thieke C. Pareto navigation – algorithmic foundation of interactive multi-criteria IMRT planning. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, vol. 53, no. 4, pp. 985–998. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/4/011>
9. Fogliata A., Wang P. M., Belosi F., Clivio A., Nicolini G., Vanetti E., Cozzi L. Assessment of a model based optimization engine for volumetric modulated arc therapy for patients with advanced hepatocellular cancer. *Radiation Oncology*, 2014, vol. 9, art. ID 236. <https://doi.org/10.1186/s13014-014-0236-0>
10. Fogliata A., Reggiori G., Stravato A., Lobefalo F., Franzese C., Franceschini D., Tomatis S. [et al.]. RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit. *Radiation Oncology*, 2017, vol. 12, no. 1, art. ID 73. <https://doi.org/10.1186/s13014-017-0805-0>
11. Fogliata A., Nicolini G., Clivio A., Vanetti E., Laksar S., Tozzi A., Scorsetti A. C., Cozzi L. A broad scope knowledge based model for optimization of VMAT in esophageal cancer: validation and assessment of plan quality among different treatment centers. *Radiation Oncology*, 2015, vol. 10, art. ID 234. <https://doi.org/10.1186/s13014-015-0545-y>
12. Foy J. J., Marsh R., Ten Haken R. K., Younge K. C., Schipper M., Sun Y., Owen D., Matuszak M. M. An analysis of knowledge-based planning for stereotactic body radiation therapy of the spine. *Practical Radiation Oncology*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 355–360. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2017.02.007>
13. Li N., Carmona R., Sirak I., Kasaova L., Followill D., Michalski J., Bosch W. R. [et al.]. Highly efficient training, refinement, and validation of a knowledge-based planning quality-control system for radiation therapy clinical trials. *International Journal of Radiation Oncology – Biology – Physics*, 2017, vol. 97, no 1, pp. 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.09.022>
14. DVH Estimation Algorithm for RapidPlan. *Eclipse Photon and Electron Algorithms Reference Guide*. Palo Alto, CA, Varian Medical Systems, 2014, pp. 219–229. Available from: https://www.varian.com/sites/default/files/resource_attachments/EclipsePhotonElectronAlgorithmsRef_0.pdf (accessed: 1 February 2025).
15. El Naqa I., Ruan D., Valdes G., Dekker A., McNutt T., Ge Ya., Wu Q. J. [et al.]. Machine learning and modeling: Data, validation, communication challenges. *Medical Physics*, 2018, vol. 45, no. 10, pp. 834–840. <https://doi.org/10.1002/mp.12811>